



PROJECTE DE DISSENY D'UN TÚNEL DE VENT OBERT

TREBALL FINAL DE GRAU

Arnau Morales Tugues

Director del projecte: José Juan de Felipe Blanch

Grau en Enginyeria Mecànica

Universitat Politècnica de Catalunya. Manresa

Curs 2019 – 2020

ÍNDIX

Índex de figures o il·lustracions.....	I
Resum	1
Abstract.....	2
1. Introducció	4
1.1. Objectius i finalitat del projecte.....	4
1.2. Limitacions.....	4
2. Antecedents	5
2.1. Justificació.....	5
2.2. Situació actual.....	6
2.2.1. Característiques d'un túnel de vent obert vs túnel de vent tancat:	6
2.2.2. Velocitat de treball	7
2.2.3. Pressió de treball.....	7
2.3. Dinàmica de Fluids Computacional (CFD).....	8
3. Definició paràmetres inicials.....	9
3.1. Elecció i definició del model de túnel de vent	9
3.2. Resultat final Túnel de Vent obert (renderitzacions)	11
4. Pre-processament: Definició del model en CATIA	17
4.1. Geometria	17
5. Pre-processament: Definició del model amb ANSYS	20
5.1. Definició del “Inlet”, “Outlet” i “Wall”	20
5.2. Mallat	24
5.3. Declaració models i mètodes:	32
5.4. Condicions de contorn	35
5.5. Condicions inicials	37
6. Simulació (post-procés)	40
6.1. Línies de velocitat per a les diferents velocitats del túnel de vent	40
6.2. Resultats presentats amb un tall en 2D	43
6.3. Contorns de pressió a diferents velocitats	46
6.4. Scaled residuals	50
7. Conclusions.....	53
8. Bibliografia.....	54
9. Annexos.....	55



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa**

Índex de figures o il·lustracions

Il·lustració 1. Pantalla d'inici de ANSYS

Il·lustració 2. Model comercial HM170 de l'empresa Gunt Hamburg

Il·lustració 3. Disseny 3D de túnel de vent obert complet mes bancada.

Il·lustració 4. Bancada de suport pel túnel de vent obert

Il·lustració 5. Concentrador d'aire més zona d'estudi

Il·lustració 6. Difusor d'aire

Il·lustració 7. Conjunt del concentrador més el difusor.

Il·lustració 8. Conjunt complet del túnel de vent amb la zona d'estudi oberta

Il·lustració 9. Model del túnel de vent utilitzat a ANSYS

Il·lustració 10. Concentrador d'aire amb hexaedre utilitzat a ANSYS

Il·lustració 11. Vista frontal concentrador d'aire amb hexaedre

Il·lustració 12. Difusor d'aire utilitzat a ANSYS

Il·lustració 13. Definició "Inlet"

Il·lustració 14. Ampliació detalls del "Inlet"

Il·lustració 15. Definició "Outlet"

Il·lustració 16. Ampliació detalls del "Outlet"

Il·lustració 17. Definició "Wall"

Il·lustració 18. Ampliació detalls "Wall"

Il·lustració 19. Valors generals de la malla completa

Il·lustració 20. Imatge de la malla completa túnel de vent

Il·lustració 21. Valors de la malla en zones sense refinar

- II·lustració 22.** Imatge de la malla en la zona del concentrador d'aire
- II·lustració 23.** Valor de refinament de la malla del concentrador d'aire
- II·lustració 24.** Imatge de la malla en la zona d'estudi
- II·lustració 25.** Valor de refinament de la malla en la zona d'estudi
- II·lustració 26.** Valors i paràmetres del model viscos
- II·lustració 27.** Equacions de K-epsilon
- II·lustració 28.** Valors de les solucions de control
- II·lustració 29.** Valors dels mètodes de solució
- II·lustració 30.** Paràmetres d'encesa
- II·lustració 31.** Valors de la velocitat del "Inlet" a 5m/s
- II·lustració 32.** Valors de la velocitat del "Inlet" a 3m/s
- II·lustració 33.** Valors de la velocitat del "Inlet" a 1m/s
- II·lustració 34.** Valors de les condicions inicials de l'aire
- II·lustració 35.** Valors de referència 5 m/s
- II·lustració 36.** Valors de referència 3 m/s
- II·lustració 37.** Valors de referència 1 m/s
- II·lustració 38.** Resultat 3D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 5 m/s
- II·lustració 39.** Resultat 3D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 3 m/s
- II·lustració 40.** Resultat 3D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 1 m/s
- II·lustració 41.** Resultat 2D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 5 m/s
- II·lustració 42.** Resultat 2D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 3 m/s
- II·lustració 43.** Resultat 2D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 1 m/s
- II·lustració 44.** Frontal del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 5 m/s

II·lustració 45. Posterior del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 5 m/s

II·lustració 46. Frontal del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 3 m/s

II·lustració 47. Posterior del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 3 m/s

II·lustració 48. Frontal del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 1 m/s

II·lustració 49. Posterior del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 1 m/s

II·lustració 50. “Scaled residuals” amb la simulació a 5m/s (Inlet)

II·lustració 51. “Scaled residuals” amb la simulació a 3m/s (Inlet)

II·lustració 52. “Scaled residuals” amb la simulació a 1m/s (Inlet)

Resum

En el present document s'ha dissenyat un túnel de vent de circuit obert subsònic el qual està enfocat a la docència. Aquest túnel permet realitzar experiments aerodinàmics de mesures de forces amb models a escala per tal d'obtenir dades i resultats molt similars als de la realitat.

Es comença amb una breu introducció esmentant els objectius principals i secundaris del present projecte així com les limitacions que aquest mateix presenta. Es continua amb una explicació dels antecedents del projecte fent èmfasi tant amb la situació actual com amb l'explicació del terme CFD.

En el procés de definició dels paràmetres inicials i del model a estudiar s'utilitzen eines de disseny amb 3D com és el CATIA. Addicionalment s'han realitzat plànols acotats per així tenir una millor comprensió del model així com els seus complements.

Pel que fa a la definició del model virtual, es duu a terme gràcies al software de CFD, ANSYS. El qual permet definir una descripció detallada del model pel que fa a mallat, fluids, física del model, condicions inicials i de contorn, entre d'altres. D'aquesta manera queden definits els passos seguits i així tenir la possibilitat de recrear i utilitzar el model definit.

Finalment es realitzen una sèrie de simulacions del model definit amb diferents velocitats d'entrada per poder estudiar la variació dels resultats segons si es treballa dins del rang de velocitats del model escollit (subsònic) o si es treballa fora d'aquest rang. Aquestes simulacions permeten veure la variació dels fluxos de velocitat així com les pressions en la que treballa el model estudiat.

A mesura que s'ha anat avançant en el projecte, s'ha pogut anar comprenent la gran avantatge que es té al disposar de software de disseny en 3D i encara més, de disposar de software de CFD del qual s'ha pogut observar la gran precisió del què disposa tot i ser software de gran complexitat. No obstant, les simulacions tant de velocitats com de pressions es consideren satisfactòries.

Abstract

The present document contains the process of designing a subsonic open-loop wind tunnel that is focused on teaching. This tunnel allows aerodynamic experiments of force measurements with scale models to obtain data and results very similar to reality.

The beginning of this project consists in a brief introduction mentioning the main and secondary objectives of such project, as well as the limitations that presents. Moreover, there is an explanation of the project's background emphasizing both the current situation and the explanation of the CFD term.

In the process of defining the initial parameters and the model to be studied, 3D design tools such as CATIA are used. Additionally, blueprints have been made to a better understanding of the model and its accessories.

Regarding the definition of the virtual model, it is performed using the CFD software, ANSYS. This allows to define a detailed description of the model in terms of the mesh, fluids, physics of the model, initial and boundary conditions, among others. These procedures enables anyone to recreate the model if considered necessary and convenient.

Finally, a series of simulations of the defined model with different Inlet speeds are performed to study the variation of the results depending on whether it is simulated within the velocity range of the chosen (subsonic) model or if it is simulated outside this range. These simulations show the variation of velocity flows as well as the pressures in which the studied model works.

As the project progressed, it has been possible to understand the great advantage of having 3D design software and even more of having CFD software from which it has been possible to observe the great precision available despite being a very complex software. However, simulations of both velocities and pressures are considered satisfactory.



1. Introducció

1.1. Objectius i finalitat del projecte

El treball de final de grau, es troba dins l'àmbit de la dinàmica de fluids computacionals (CFD) i de l'enginyeria gràfica. Més concretament es tracta d'un treball que concerneix als túnels subsònics de vent de circuit obert, on es fa un disseny i un anàlisi computacional de fluids amb simulacions sobre el producte final, per corroborar el correcte funcionament del disseny escollit.

L'objectiu general d'aquest projecte consisteix en dissenyar i simular un túnel de vent subsònic de circuit obert amb l'ajuda de software de disseny amb 3D, utilitzant el programa CATIA, i amb el software de CFD, utilitzant el programa ANSYS.

En els objectius específics s'inclou:

- Du a terme un model 3D compatible amb el programa ANSYS, evitant pèrdues de fluids.
- Dissenyar una bancada pel model del túnel de vent, amb tots els seus components.
- Realitzar plànols acotats segons la normativa vigent UNE 22768 (ISO 2768) ⁽¹⁾
- Executar renderitzacions per tal d'aconseguir una millor visualització en el producte final.

1.2. Limitacions

La principal limitació que s'ha detectat és en la utilització de dades per du a terme el disseny en 3D degut a l'escassa informació del model de referència de l'empresa GUNT. La fitxa tècnica del seu producte presenta només parcialment la informació per així evitar possibles reproduccions no lícites. Davant d'aquesta situació s'ha hagut de realitzar un estudi extens en relació a les dimensions reals del model.

Addicionalment, les característiques de l'ordinador utilitzat per dur a terme el CFD han ocasionat un augment en el temps d'espera de les

simulacions i d'aquesta manera només s'ha pogut fer 100 iteracions per cada velocitat d'entrada.

Així mateix, degut a les propietats de l'ordinador, per poder afinar el mallat del model, també resultava amb un temps d'espera elevat o fins i tot el programa s'aturava arrel de no suportar la càrrega de treball que li suposava afinar de forma tan acurada la malla.

Així doncs, l'exhaustiu estudi de la part electrònica (sensors, cèl·lules de càrrega, ventilador axial, etc.) del túnel de vent no s'afegeix com a objectius marcats en el treball.

Tanmateix, s'ha pogut simular el flux laminar obviant el *honeycomb*, el qual permet que aquest fenomen es dugui a terme, i per aquest motiu no s'ha inclòs en el projecte.

2. Antecedents

2.1. Justificació

El projecte del disseny i simulació d'un túnel de vent obert ha estat orientat per l'Escola Politècnica d'Enginyeria Superior de Manresa (EPSEM) a causa de la impartició extensa de coneixements de mecànica de fluids tant en el grau d'automoció com en el grau d'enginyeria mecànica. És per aquest motiu, que amb l'objectiu de la universitat d'implementar un túnel de vent per dur a terme pràctiques experimentals en els diferents graus, s'ha dut a terme aquest projecte i resultarà amb un augment de recursos pel seu respecte ús en les diferents assignatures.

En conseqüència, el projecte, té uns fins principalment acadèmics centrats en la investigació i aportació de nous coneixements i/o nous mètodes d'aprenentatge per l'estudiant.

2.2. Situació actual

Un túnel de vent es podria definir com un sistema que genera un corrent d'aire controlat dins d'una secció d'estudi. Tenen la capacitat d'aconseguir situacions específiques de flux d'aire per així poder analitzar diferents fenòmens aerodinàmics (forces, línies de corrent, esforços, etc.) els quals poden afectar a diferents objectes.

Els túnels de vent es poden classificar de diferents formes:

- Segons la velocitat de treball respecte la velocitat del so
- En funció del tipus de circuit, obert o tancat.
- Referent a la pressió de treball, els quals poden ser atmosfèrics o de densitat variable.

2.2.1. Característiques d'un túnel de vent obert vs túnel de vent tancat:

El túnel de vent obert presenta els següents avantatges:

- El cos de la construcció és relativament més baix.
- Gran quantitat de ventilació, d'aquesta manera es poden fer estudis amb generadors de boira / fum.

Inconvenients del túnel de vent obert:

- L'alta qualitat del flux d'aire que entrarà per l'*inlet*, dependrà àmpliament de les dimensions de la localització on es trobarà.
- L'energia consumida dependrà de les dimensions i la velocitat del túnel de vent.
- Pot generar limitacions en l'horari d'ús a causa del soroll que emet.

El túnel de vent tancat presenta els següents avantatges:

- La qualitat del flux d'aire serà fàcilment controlable gràcies als colzes i a les pantalles de gir i no dependrà de les activitats externes o condicions climatològiques.

- Per obtenir un flux adequat no requerirà d'un excés d'energia.
- La contaminació acústica serà menor respecte el túnel de vent de circuit obert.

Inconvenients del túnel de vent tancat:

- El cost inicial serà més elevat degut a les pantalles de gir i els conductes de retorn de l'aire.
- S'haurà de purgar periòdicament per la respecte realització d'estudis amb generadors de boira / fum.
- Amb un alt grau d'utilització s'hauria d'instal·lar un sistema de refrigeració d'aire per així evitar el sobre escalfament de l'aire accelerat.

2.2.2. Velocitat de treball

Els túnels de vent es poden classificar segons la seva velocitat en la secció de proves. La relació de la velocitat del vent respecte la velocitat del so s'anomena número de March (número de March = $1 = 340 \text{ m/s}$) ⁽²⁾.

En conseqüència, els túnels estan classificats com:

- Subsònic: número de March < 0.8 .
- Transsònic: $0.8 < \text{número de March} < 1.2$.
- Supersònic: $1.2 < \text{número de March} < 5$.
- Hipersònic: número de March > 5 .

2.2.3. Pressió de treball

En referència a la pressió de treball, els túnels de vent es poden classificar segons la pressió atmosfèrica o la pressió controlada (densitat variable).

La pressió atmosfèrica es dona principalment en els casos on el túnel de vent és de circuit obert ja que està en contacte amb el medi ambient o amb el seu exterior.

La pressió controlada (densitat variable) es dona en la majoria dels casos on el túnel de vent és de circuit tancat degut a l'aïllament de l'exterior això inclou també els túnels de vent verticals.

Actualment, els túnels de vent realitzen una funció essencial per la investigació i avanç en l'estudi de l'aerodinàmica, ja que permeten la possibilitat d'observar resultats qualitatius i quantitatius a escala reduïda dels objectius dels diferents projectes a escala real.

La construcció d'un túnel de vent a les instal·lacions universitàries suposaria una millora exponencial per l'estudi i investigació del comportament de diferents cossos envers a les condicions creades dins al túnel.

2.3. Dinàmica de Fluids Computacional (CFD)

El CFD és una branca de la mecànica de fluids que utilitza l'anàlisi numèric i l'estructura de dades per així analitzar i resoldre problemes del flux de fluids. Els ordinadors s'encarreguen de fer els càlculs per simular flux lliure de fluids i interacció de fluids (líquids i gasos) amb superfícies les quals tenen condicions de contorn. En conseqüència, el CFD ens permet una àmplia varietat de casos els quals estudiar.

Així mateix, *Ansys*, el programa utilitzat per aquest projecte, és un programa que disposa d'un bloc de CFD que ha permès simular el flux de treball en el model de túnel de vent de circuit obert.

L'Ansys 19.2, per se, és un programa de gran complexitat ja que disposa d'una àmplia varietat de paràmetres els quals requereixen un ajust precís per així poder obtenir uns resultats el màxim d'aproximat possibles al resultat esperat. Es disposa de diferents manuals per l'usuari, d'aquesta manera es pot realitzar un aprenentatge autònom. Tanmateix, és un programa d'avançada complexitat. ⁽³⁾



Il·lustració 1. Pantalla d'inici de ANSYS

3. Definició paràmetres inicials

3.1. Elecció i definició del model de túnel de vent

L'elecció del model del túnel de vent de circuit obert va ser proposada pel departament de dinàmica de fluids de la universitat, el qual està orientat pel model comercial de l'empresa alemanya GUNT Hamburg.



Il·lustració 2. Model comercial HM170 de l'empresa Gunt Hamburg

El model escollit presenta unes característiques ideals per l'ensenyament, addicionalment, té un preu moderat tenint en compte el cost elevat que poden arribar a tenir aquest tipus de models.

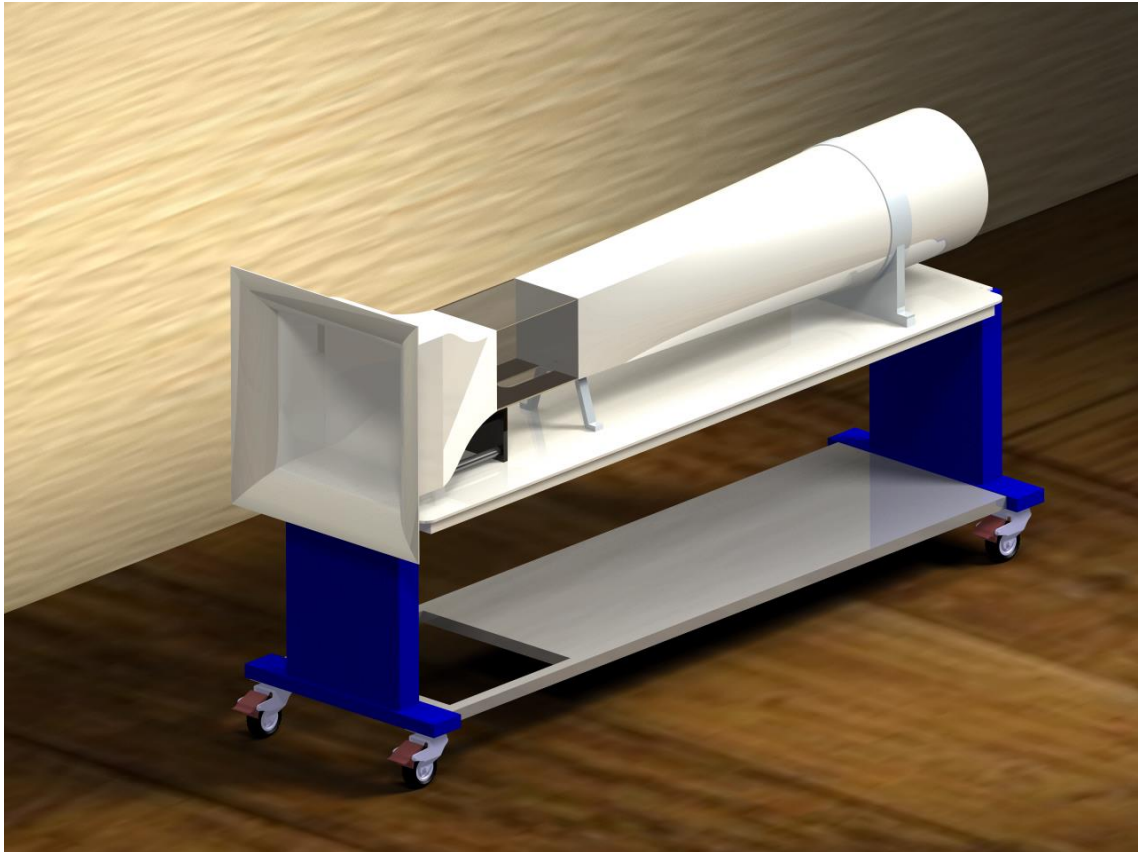
El tipus HM 170 escollit per aquest projecte és de tipus "Eiffel" el qual significa que és un túnel de vent obert pels dos laterals, atmosfèric, subsònic amb la zona d'estudi transparent, la qual disposa de la característica que es pot obrir i es pot intercanviar l'objecte d'estudi.

La zona d'estudi ha estat dissenyada a partir de les mesures de l'empresa alemanya les quals són les següents: 292x292x420mm (Annex 4)

Totes les demés mesures han estat calculades segons les mesures de la zona d'estudi i les mesures totals del túnel de vent, que són les següents: 2870x890x1540mm (Annexes 1 - 10).

Per aquest motiu, degut al concentrador del flux es pot obtenir un ampli rang de velocitats en la zona d'estudi a més d'obtenir un flux laminar. Aquest rang té la capacitat d'anar d'entre 3'1 m/s fins a 28 m/s sempre en la zona d'estudi. Aquest espai, com s'ha esmentat anteriorment, és rectangular per així donar una millor estabilitat del flux. Addicionalment, el difusor permet una desacceleració estable del flux per una millor sortida de forma segura. Aquest difusor consta d'una transició de secció quadrada a una secció circular per així poder encabir el ventilador axial.

3.2. Resultat final Túnel de Vent obert (renderitzacions)



Il·lustració 3. Disseny 3D de túnel de vent obert complet mes bancada.

En la imatge (il·lustració 1) es pot observar la renderització del conjunt complet del projecte del túnel de vent obert. Tots els components han estat dissenyats excepte les rodes de la bancada que s'han extret d'un producte comercial. Aquest conjunt està format per:

- El túnel de vent obert
- La bancada

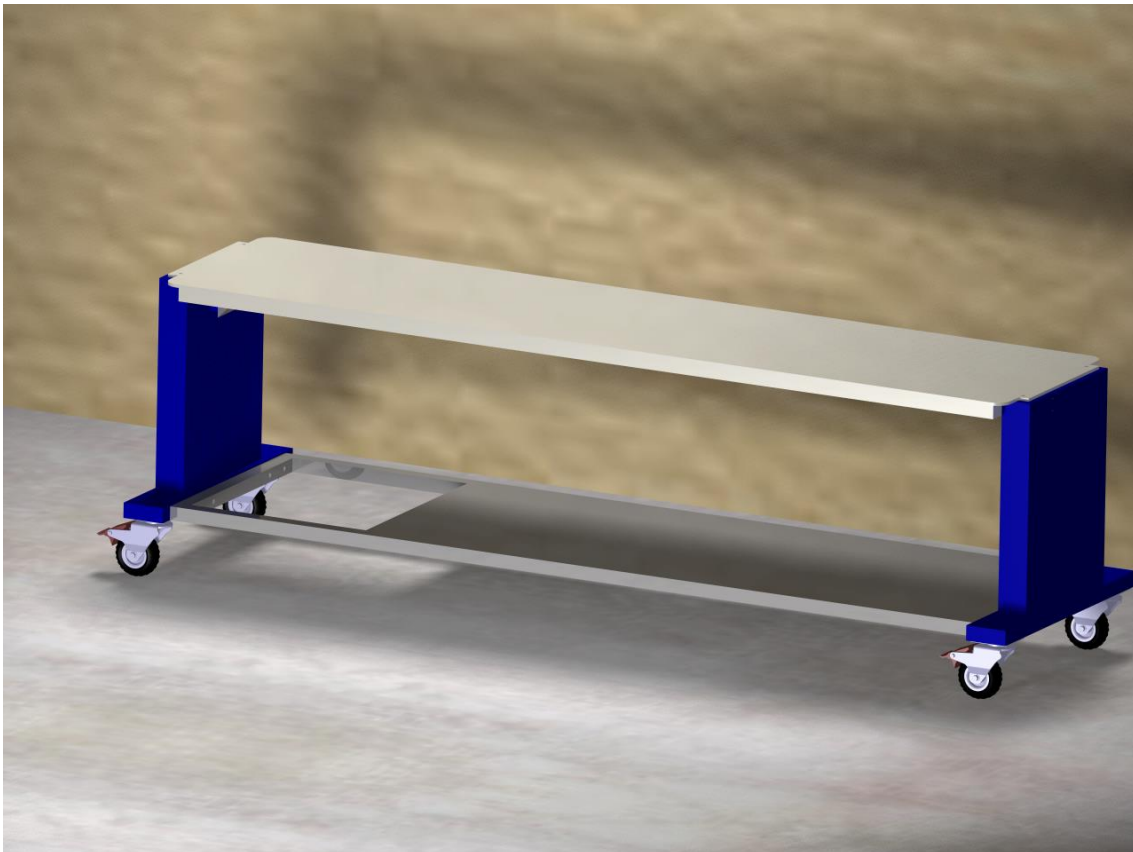
Pròpiament, el túnel de vent obert està format per:

- El concentrador d'aire més la zona d'estudi
- El difusor d'aire

La bancada està formada per:

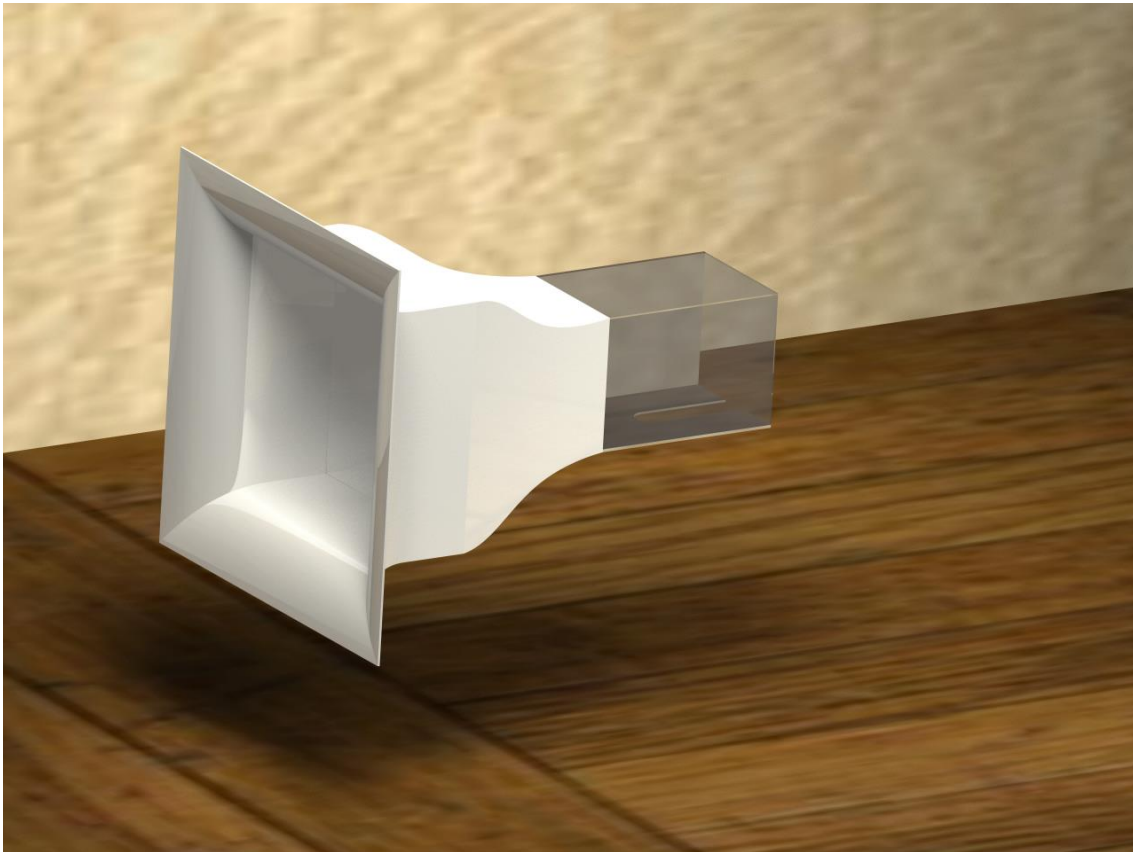
- La taula superior
- Els reforços laterals

- La taula inferior
- Suport per les rodes de la bancada
- Colzes de reforç
- Les rodes de la bancada
- Així com tota la cargolaria que ho uneix.



Il·lustració 4. Bancada de suport pel túnel de vent obert

En la imatge (il·lustració 2) es pot observar la renderització realitzada de la bancada assemblada (tots els components units). En els annexes (Annexes 6 - 10) es pot trobar una acotació de les peces individuals que conformen la bancada per una millor comprensió. Addicionalment, la bancada s'ha realitzat sense cap mesura prèvia, és a dir, el disseny s'ha dut a terme sense cap informació de mides prèvies.



Il·lustració 5. Concentrador d'aire més zona d'estudi

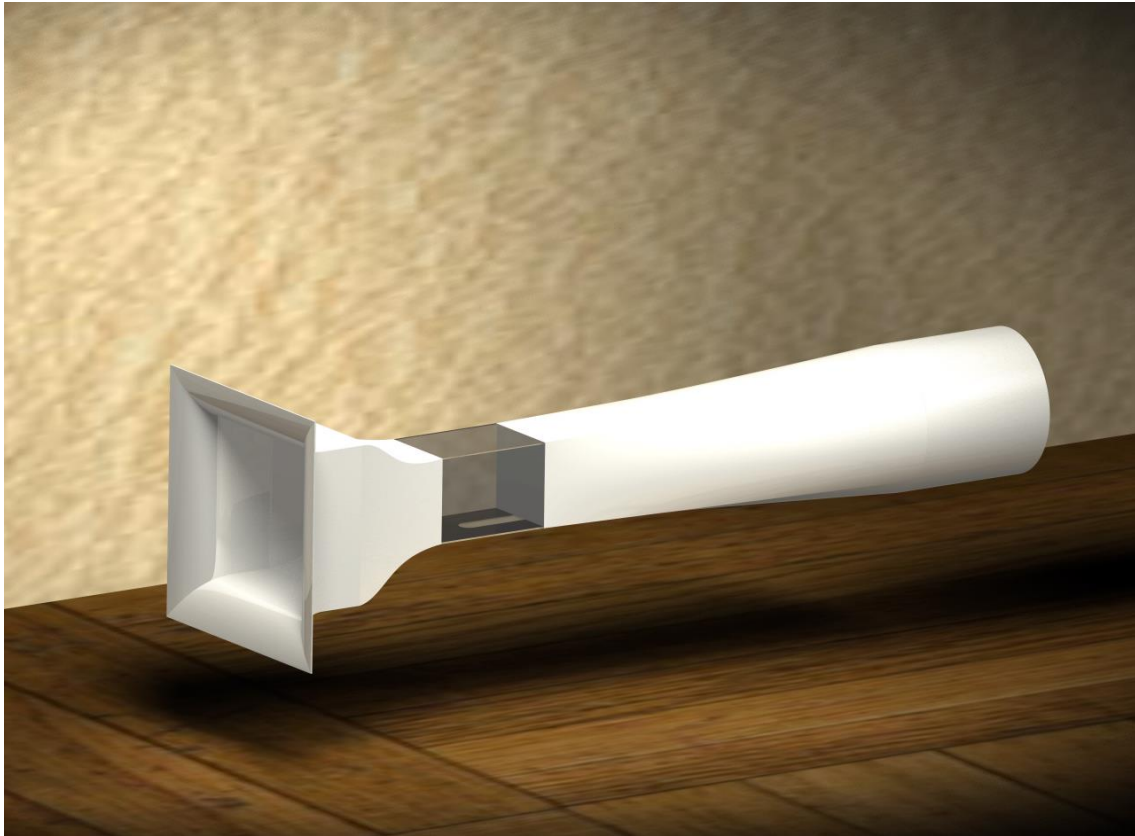
En la imatge (il·lustració 3) es pot observar la renderització del conjunt de concentrador d'aire més la zona d'estudi. Aquest conjunt consta de dues parts però sempre és fixe ja que en la zona d'estudi i del concentrador, les juntes han de ser les mínimes possibles per evitar turbulències.

Com també es pot observar la zona d'estudi és transparent per una millor visualització de les línies de corrent d'aire que afecten l'objecte a estudiar. Així mateix, la geometria del concentrador d'aire és de gran complexitat degut a que la transició entre les seccions quadrades s'ha de realitzar de manera suau, la qual implica una tangència tant en la secció de mida gran com en la de mida petita provocant que el concentrador tingui una geometria sinusoïdal. Tanmateix es pot consultar als annexes (Annex 4) per una millor comprensió de la geometria descrita.



Il·lustració 6. Difusor d'aire

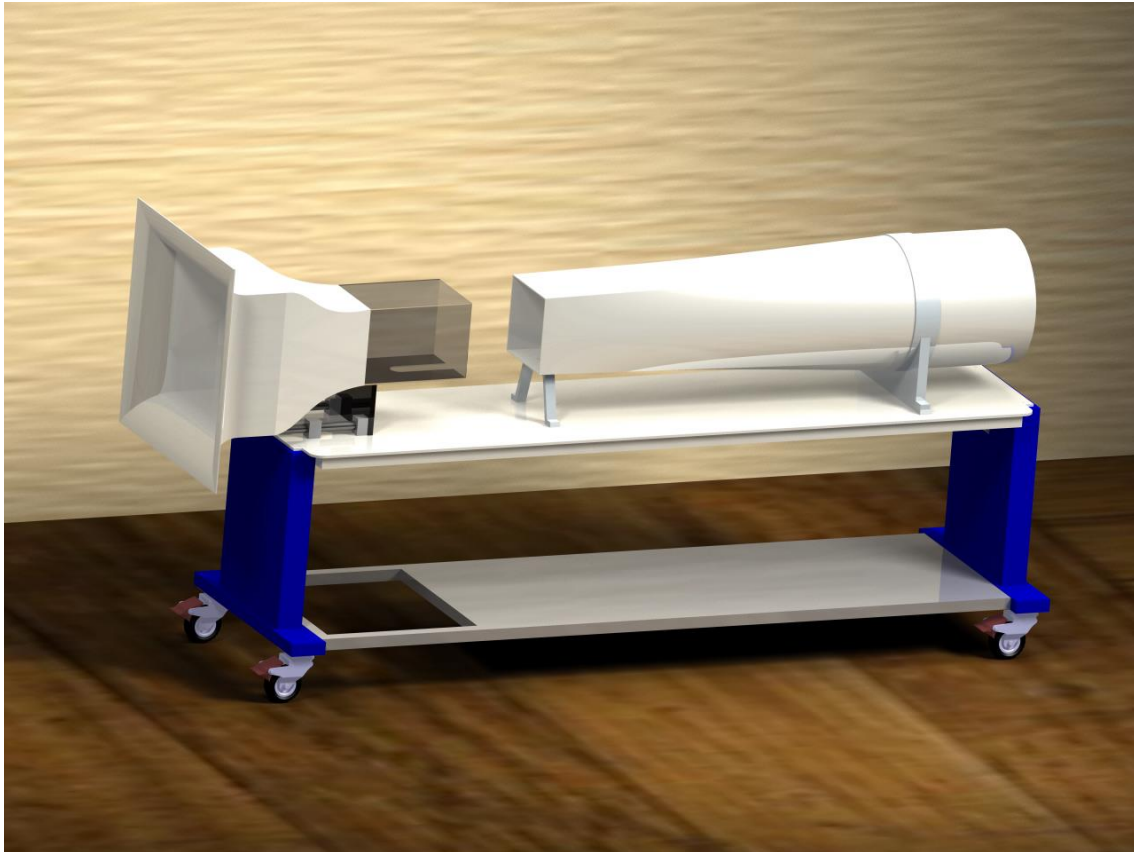
En la imatge (il·lustració 4) s'observa el difusor d'aire del túnel de vent que consta d'una transició d'una secció quadrada a una secció circular, degut a que es parteix de la zona d'estudi (hexaedre) i es transforma cap a la zona del ventilador axial (circular). Addicionalment, la zona final del difusor és d'unes dimensions considerablement majors a la zona d'estudi per així obtenir una millor desacceleració de l'aire que prové d'aquesta. Per una millor comprensió del conjunt es pot consultar a l'annex (Annex 5).



Il·lustració 7. Conjunt del concentrador més el difusor.

En la imatge (il·lustració 5) s'observa la renderització de la unió del concentrador d'aire i zona d'estudi més el difusor. D'aquesta manera és com s'han de realitzar els estudis amb el túnel de vent obert.

En els annexes (Annex 2) es pot observar la distinció entre les parts del conjunt.



Il·lustració 8. Conjunt complet del túnel de vent amb la zona d'estudi oberta

En la imatge (il·lustració 6) s'observa la renderització de la funcionalitat del que disposa el conjunt del túnel de vent obert. Aquesta funcionalitat és la de poder separar la zona d'estudi del difusor d'aire per així poder substituir els models d'estudi dins del túnel de vent. Aquesta obertura es dona gràcies a les guies localitzades a la zona frontal de la bancada que només permeten el moviment horitzontal. Tanmateix, les rodes de les bancades disposen de frens per estabilitzar el túnel de vent. Com també s'observa el túnel està fixat a la bancada mitjançant tres punts de suport, els quals són:

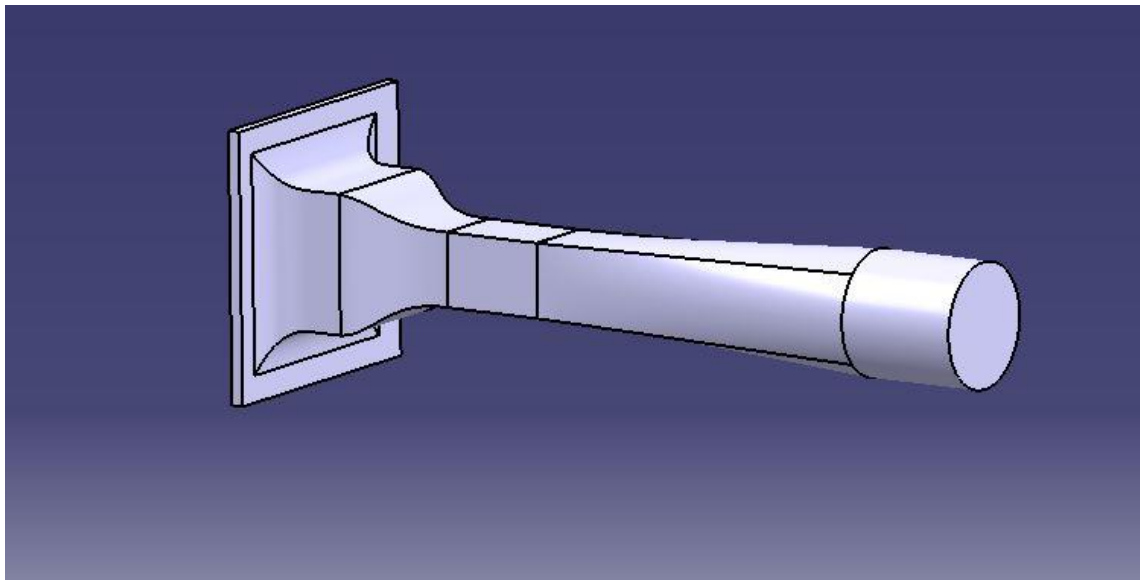
- Les guies de la zona del concentrador d'aire, que serveixen tant per desplaçar com de suport.
- El suport central, a l'inici del difusor.
- El suport de la zona circular que es localitza al començament de la zona on es troba el ventilador axial que serveix tant per subjectar el túnel de vent com per absorbir les possibles vibracions del ventilador axial.

4. Pre-processament: Definició del model en CATIA

4.1. Geometria

Com s'ha esmentat anteriorment, les mesures per poder dissenyar la geometria del model en 3D s'han obtingut de l'empresa alemanya GUNT Hamburg.

Tanmateix, per poder simular amb el programa ANSYS, s'ha hagut de crear una adaptació del model ja dissenyat, ja que l'objectiu és simular l'aire que circula per l'interior del túnel de vent. Per aquest motiu, el model proposat per poder dur a terme la simulació és el que es mostra en la Imatge (il·lustració 9).



Il·lustració 9. Model del túnel de vent utilitzat a ANSYS

Com es pot observar, aquest model és similar al model original, les úniques diferències que es poden observar són les següents:

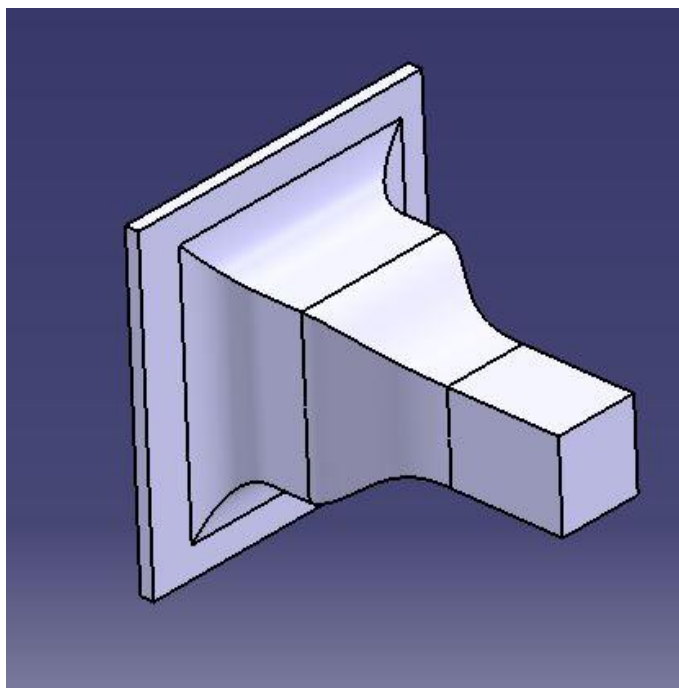
- Model totalment tancat.
- La part frontal té adherit un petit hexaedre.
- Model és un sòlid complet (està ple per dins).

Aquestes modificacions s'han realitzat per diferents raons les quals s'esmenten a continuació.

El model tancat significa que totes les unions son fixes, és a dir, simulant una unió soldada, i per tant perd qualsevol tipus de mobilitat que tenia anteriorment. Serveix principalment perquè un cop es posa el model dins el programa ANSYS, aquest no detecti cap fuga i per tant es pugui mallar bé el model i pugui simular adequadament les interaccions que té el fluid amb les parets.

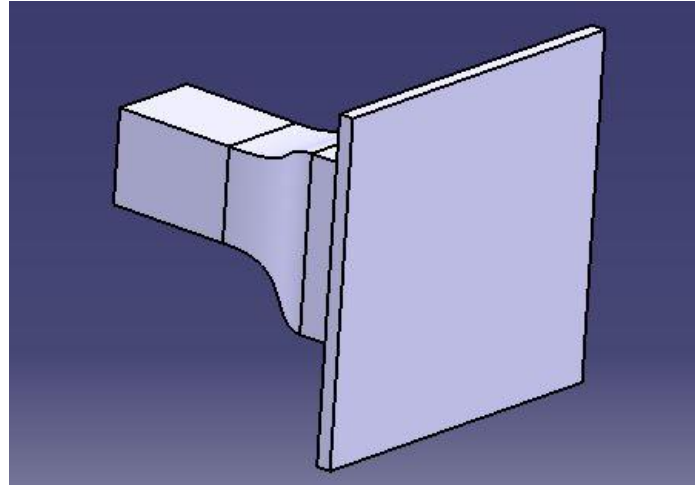
El petit hexaedre que s'adhereix a la part frontal del túnel de vent, serveix com a "zona" d'aire en repòs, degut a que a l'hora de simular el fluid, aquest no comenci tocant directament les parets del concentrador d'aire, ja que en condicions reals, el fluid que és succionat pel túnel de vent, prové de l'exterior.

Tanmateix, el model és un sòlid complet, ja que el programa ANSYS simula com a fluids els volums (sòlids) que se li carreguen, és a dir, que si es volgués simular el comportament d'un perfil alar en ANSYS el que s'hauria de dur a terme és crear un hexaedre de dimensions mes grans que el perfil alar i seguidament extreure la forma d'aquest perfil de dins l'hexaedre creat anteriorment, per així deixar la forma "negativa" del perfil alar.



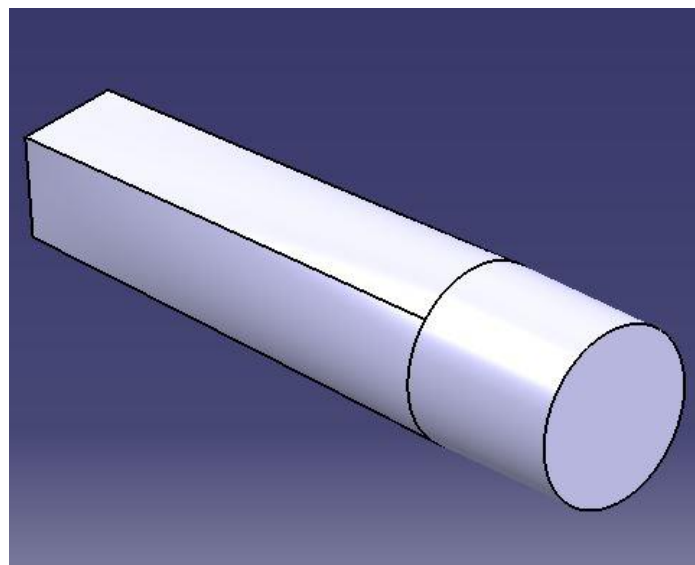
Il·lustració 10. Concentrador d'aire amb hexaedre utilitzat a ANSYS

En la imatge anterior (il·lustració 10) es pot observar com el model és ple per dins i es pot observar més detalladament la funció que desenvolupa l'hexaedre.



Il·lustració 11. Vista frontal concentrador d'aire amb hexaedre

La imatge (il·lustració 11) serveix per poder tenir una millor percepció de quina forma i de fins a on avarca el hexaedre col·locat a l'inici del concentrador d'aire



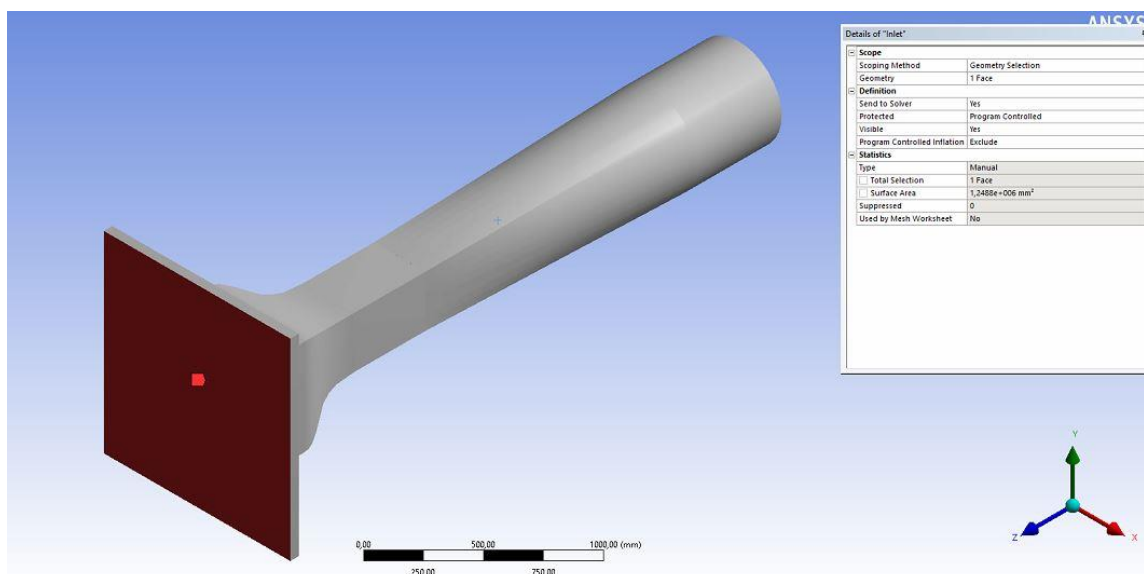
Il·lustració 12. Difusor d'aire utilitzat a ANSYS

En la imatge (il·lustració 12), la del difusor d'aire, es pot observar que es compleixen les mateixes condicions, que en el concentrador d'aire, és a dir, que el model és un sòlid i les seves unions són fixes.

5. Pre-processament: Definició del model amb ANSYS

5.1. Definició del “Inlet”, “Outlet” i “Wall”

Per poder definir les condicions de contorn, el sentit del flux, la malla i altres paràmetres per poder realitzar la simulació, primer es defineixen les parts del que consta el model. En aquest apartat es mostra com s'ha aconseguit tal definició.



Il·lustració 13. Definició “Inlet”

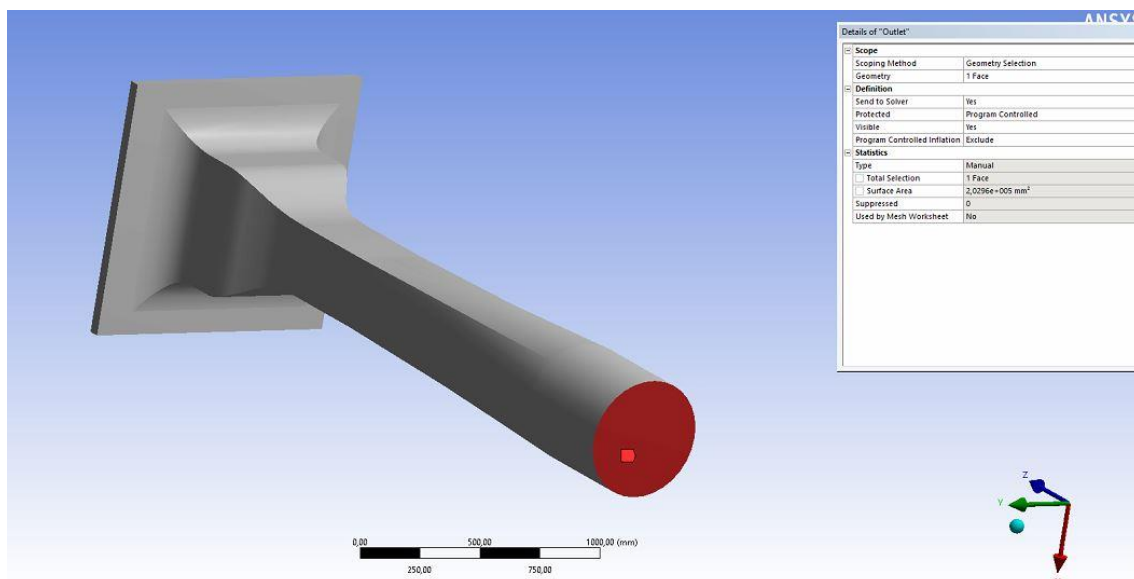
Details of "Inlet"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Send to Solver	Yes
Protected	Program Controlled
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
[-] Statistics	
Type	Manual
<input type="checkbox"/> Total Selection	1 Face
<input type="checkbox"/> Surface Area	1,2488e+006 mm ²
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

Il·lustració 14. Ampliació detalls del “Inlet”

En les il·lustracions 13 i 14, es pot observar com s'ha realitzat la definició del “Inlet”.

“Inlet” fa referència a la zona on es simula l'entrada de flux d'aire, en aquest cas es pot distingir per la coloració vermella (il·lustració 13) que és la cara externa de l'hexaedre situat al frontal del túnel de vent. Addicionalment, esmentar que en el model real, l'aire és succionat des de la part del difusor d'aire on es localitza el ventilador axial, tot i així l'entrada de l'aire coincideix amb la cara seleccionada per la simulació, per tant, podem considerar com a correcte la definició del “Inlet”.

Seguidament, en la il·lustració 14 s'observa més detalladament quins són els paràmetres de la definició del “Inlet”, en els quals es pot destacar, que el “Inlet” consta d'una sola cara, la qual ha sigut seleccionada manualment i es mostra el valor de l'àrea de la cara seleccionada.



Il·lustració 15. Definició “Outlet”

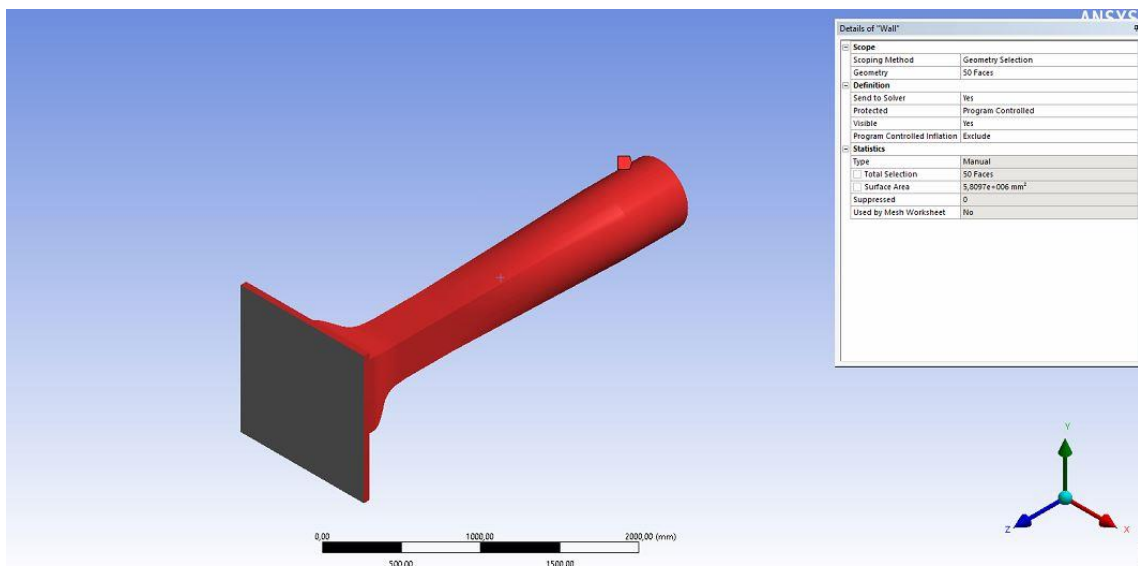
Details of "Outlet"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Send to Solver	Yes
Protected	Program Controlled
Visible	Yes
Program Controlled Inflation	Exclude
[-] Statistics	
Type	Manual
<input type="checkbox"/> Total Selection	1 Face
<input type="checkbox"/> Surface Area	2,0296e+005 mm ²
Suppressed	0
Used by Mesh Worksheet	No

Il·lustració 16. Ampliació detalls del "Outlet"

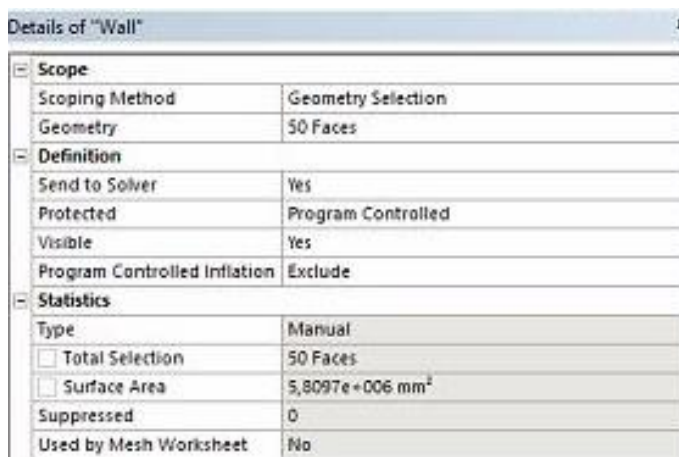
En les il·lustracions 15 i 16, es pot observar com s'ha realitzat la definició del "Outlet".

"Outlet" fa referència a la zona on es simula la sortida del flux d'aire. En la il·lustració 15, es pot distingir per la seva coloració vermella, la qual està situada a l'extrem oposat del "Inlet". Tanmateix, en aquest cas la sortida del flux d'aire en el model real i el model de la simulació coincideixen, per tant es pot donar per vàlid automàticament.

De la mateixa manera, en la il·lustració 16 s'observa més detalladament quins són els paràmetres de la definició del "Outlet", els quals es podrien destacar els mateixos que els del "Inlet": el "Outlet" consta d'una sola cara, la qual ha sigut seleccionada manualment i es mostra el valor de l'àrea de la cara seleccionada.



Il·lustració 17. Definició "Wall"



Il·lustració 18. Ampliació detalls "Wall"

En les il·lustracions 17 i 18, es pot observar com s'ha realitzat la definició de la "Wall".

"Wall" fa referència a la zona on es simula el cos per on passa el flux d'aire, es representa en coloració vermella en la il·lustració 17, que tal i com s'observa avarca tot el cos del túnel de vent exceptuant l'entrada i sortida del flux d'aire. Així mateix, cal esmentar que el domini de la "Wall" també considera una part de l'hexaedre situat al principi del túnel de vent, però per aquest cas no afecta als resultats finals, ja que és una manera per dirigir l'aire de la zona de repòs cap al concentrador d'aire.

Adicionalment, la il·lustració 18 es mostra una ampliació sobre els detalls de la definició del domini “*Wall*”, de la qual es pot destacar que aquest domini està format per 50 cares, ja que s’han de seleccionar totes les cares les quals està formada tot el cos del túnel de vent. Les cares s’han seleccionat manualment i la suma de totes aquestes es pot veure com a àrea de la superfície (*Surface Area*).

5.2. Mallat

Un mallat és un conjunt de vèrtex, arestes i cares que serveixen per definir la forma d’un objecte polièdric en modelatge en 3D i altres programes informàtics. Les cares solen consistir en triangles, d’aquest mètode s’anomena malla triangular, tot i que poden tenir altres formes poligonals, tal com hexàgons, quadrilàters, etc.

En aquest apartat s’exposa els mètodes que s’ha utilitzat per poder dur a terme el mallat del model del túnel de vent.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
Element Size	Default
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	7
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	3558,6 mm
Average Surface Area	1,3964e+005 mm ²
Minimum Edge Length	50, mm
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	8
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Assembly Meshing	
Method	None
Advanced	
Number of CPUs for Parallel...	Program Controlled
Straight Sided Elements	
Number of Retries	Default (0)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	779707
Elements	4302271

Il·lustració 19. Valors generals de la malla completa

Respecte la imatge (il·lustració 19) s'observen els valors generals de la malla. Aquest concepte significa que la malla parteix d'aquestes condicions i a partir d'aquestes s'han fet les convenient modificacions que s'expliquen més endavant en algunes zones específiques.

Com s'observa, la definició de la malla es pot separar en diferents sectors:

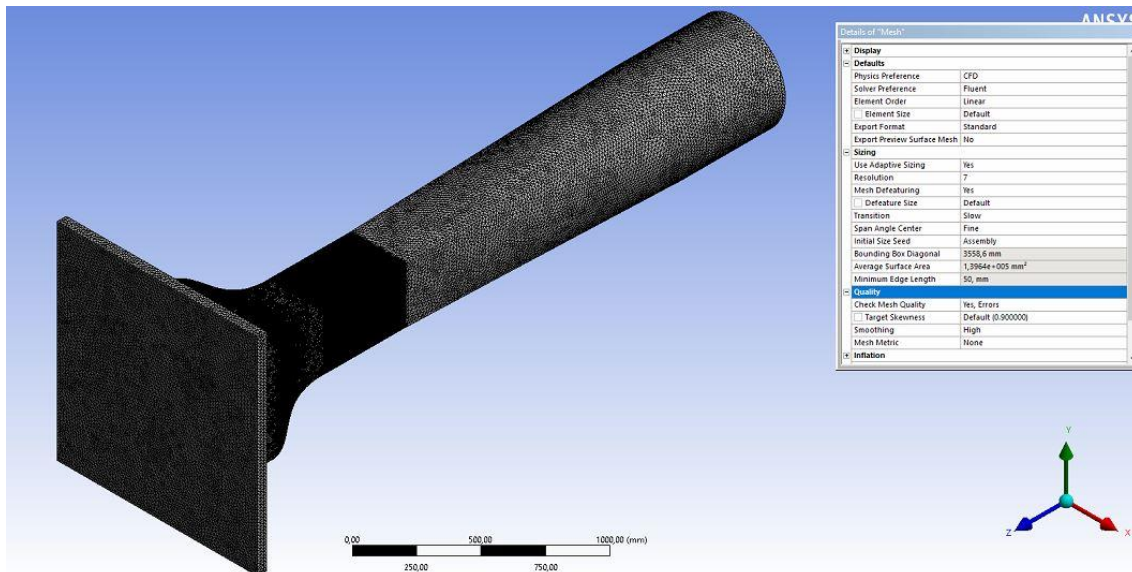
- *Display*: Determina la manera de mostrar la geometria que s'utilitza en el cas del mallat

- *Defaults*: Serveix per informar a l'usuari d'alguns paràmetres bàsics a escollir.
- *Sizing*: En aquest apartat es poden observar els valors que s'ha donat al dimensionament de la malla.
- *Quality*: Dins d'aquest departament es pot variar la qualitat de la malla segons si es vol més o menys "suau".
- *Inflation*: Serveix per variar la precisió i transició de la malla i entre determinades zones del cos.
- *Assembly meshing*: Aquest punt informa de quin mètode de mallat s'ha fet servir.
- *Advanced*: En aquest apartat es mostren tots els valors d'àmbit més avançat que s'han realitzat.
- *Statistics*: Mostra un resum de la quantitat de nodes i elements del qual està formada la malla creada.

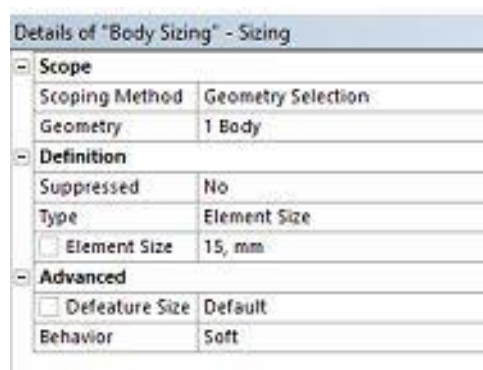
Els valors més importants a tenir en compte són els següents:

- *Sizing*
- *Quality*
- *Inflation*

Amb aquests tres apartats es pot definir amb molta precisió tota la malla tant de manera general com en les zones on es necessiti més precisió. Els demés apartats també contribueixen a la definició de la malla, però els més significatius són els tres esmentats anteriorment.



Il·lustració 20. Imatge de la malla completa túnel de vent



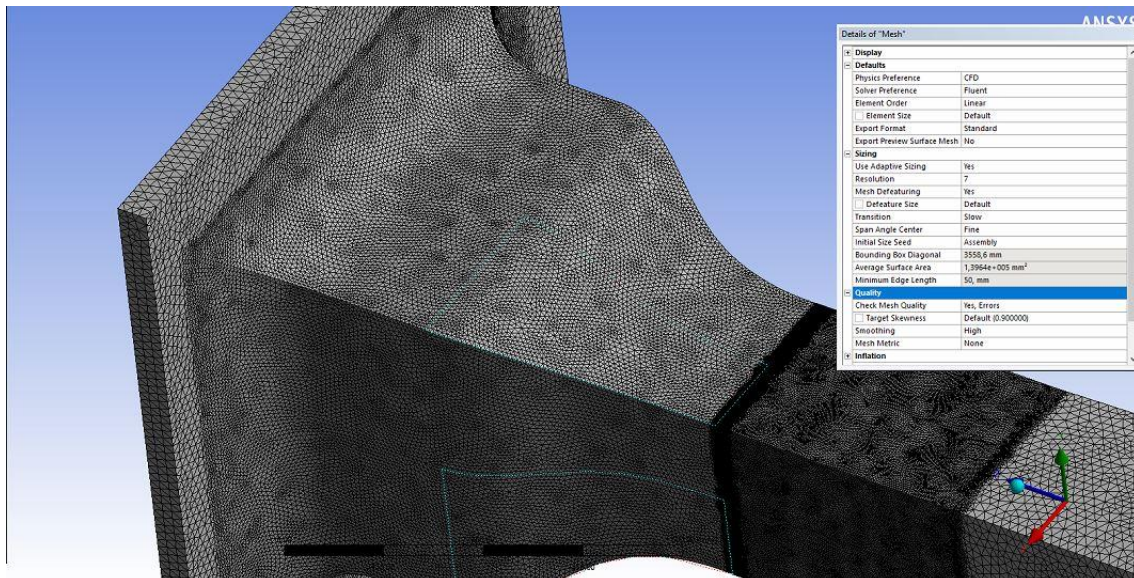
Il·lustració 21. Valors de la malla en zones sense refinar

En les imatges anteriors (il·lustracions 20 i 21) s'observa el mallat complet general de tot el model. Cal destacar que les zones les quals afecte aquest tipus de mallat són:

- Hexaedre al inici del túnel de vent
- Difusor d'aire

Degut a que aquestes zones tenen una demanada de precisió més baixa que les altres zones a estudiar.

En aquest cas, la il·lustració 21 mostra amb detall el “*Sizing*” general de la malla. El valor a destacar és “*Element Size*” el qual com s’observa és de 15mm. És important destacar que el model té unes dimensions considerables, per tant fa que el “*Element Size*” ja sigui significativament precís. Tanmateix, un altre valor a destacar és el “*Behavior*” el qual determina el comportament que té la malla al arribar a zones de geometria més complexa. En aquest cas és del caràcter “*Soft*” el qual significa que utilitza més recursos geomètrics per poder definir amb precisió els punts que podrien arribar a ser conflictius degut a la complexitat de la seva naturalesa geomètrica.



Il·lustració 22. Imatge de la malla en la zona del concentrador d'aire

Details of "Refinement 2" - Refinement	
- Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	24 Faces
- Definition	
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Refinement	1

Il·lustració 23. Valor de refinament de la malla del concentrador d'aire

En la imatge (Il·lustració 22) es pot observar la malla en la zona del concentrador d'aire, que com es pot distingir és diferent tant al mallat fet

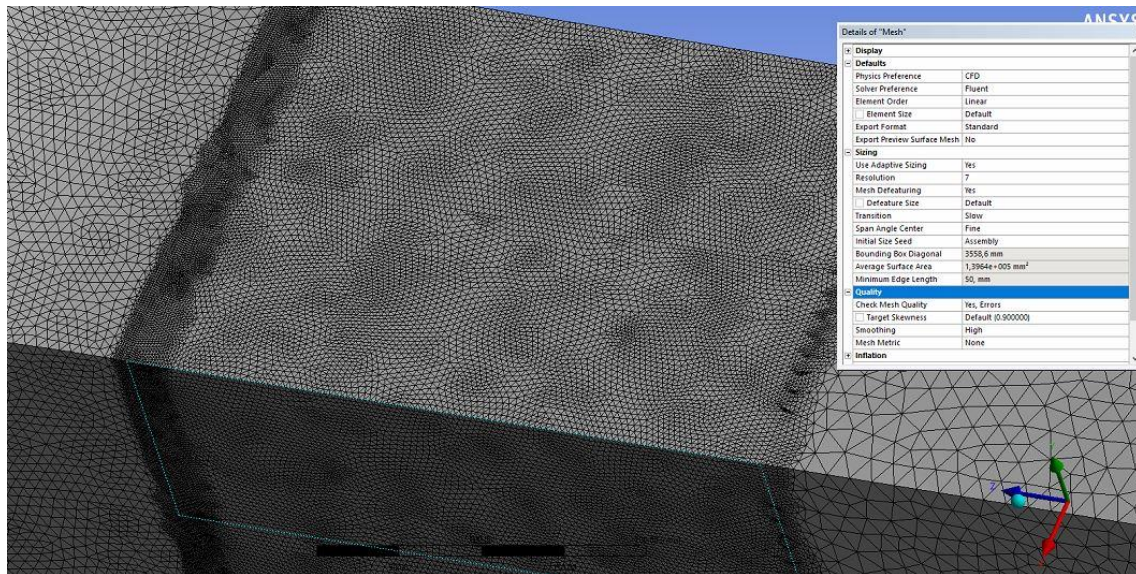
a les parts del hexaedre frontal com en el difusor d'aire (aquestes dues zones tenen un mallat global), també és diferent al mallat utilitzat a la zona d'estudi la qual s'explica en l'apartat següent.

La següent imatge que es pot observar (il·lustració 23), és un detall dels valors de la malla on s'hi pot diferenciar dues característiques importants:

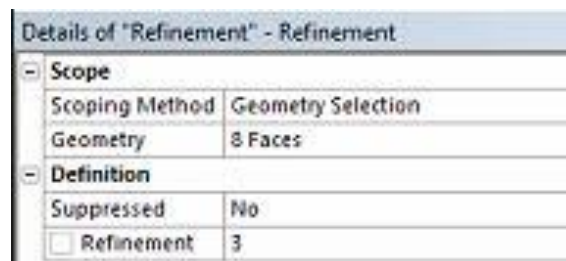
- *Geometry*
- *Refinement*

La "*Geometry*" ens indica la quantitat del model on esta aplicada la malla en qüestió, això ens dona una visió de l'abast del tipus de malla.

Adicionalment, el "*Refinement*" tal i com indica el seu nom, serveix per indicar la qualitat de refinament de la malla, això volent dir que la mida i la separació entre geometria de la malla (en aquest cas triangles) és menor i també que hi ha un major afinament en les transicions que es fan entre zones del model a mallar, com exemple, entre el hexaedre de la part frontal del túnel de vent i el concentrador d'aire i entre el concentrador d'aire i la zona d'estudi.



Il·lustració 24. Imatge de la malla en la zona d'estudi



Il·lustració 25. Valor de refinament de la malla en la zona d'estudi

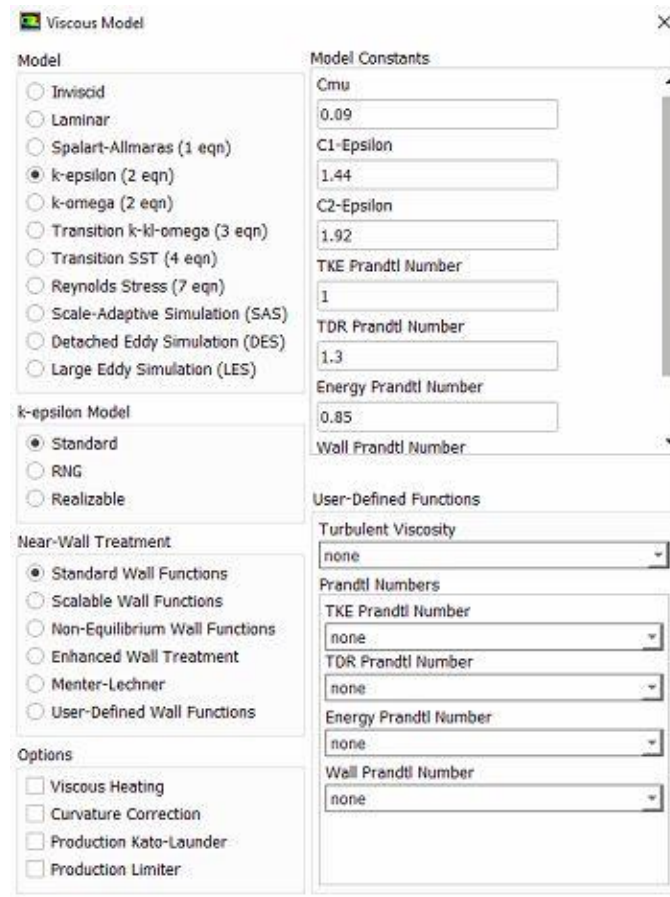
En la imatge anterior (il·lustració 24) s'observa el mallat de la zona d'estudi. Tanmateix, podem veure els tres tipus de mallat que té el model del túnel de vent. Es pot observar com la part del difusor d'aire (a la part dreta de la imatge) té un mallat més simple que les altres dues zones, tot i això és un mallat d'una precisió elevada tal i com s'ha esmentat en l'explicació de les primeres dues imatges. Seguidament podem veure el mallat de la zona del concentrador d'aire (es troba a l'esquerra de la imatge), el qual té un afinament més alt que el mallat del difusor però tal i com es pot observar no arriba al nivell de afinament aconseguit en la zona d'estudi.

Per tant, el mallat en la zona d'estudi (situat al centre de la imatge) és el mallat amb major qualitat, precisió i afinament aconseguit. Tal i com es pot observar en la il·lustració 25, el mallat de la zona d'estudi consta de 8 cares les quals estan sota un nivell de afinament de 3. Aquest valor contrasta amb el nivell d'afinament que té la zona del concentrador d'aire el qual és de nivell 1. Addicionalment, la transició entre les zones també són d'una gran precisió per així obtenir la millor continuïtat en els resultats gràfics i numèrics de les simulacions.

L'afinació de la malla en la zona del concentrador d'aire i espacialment en la zona d'estudi s'utilitza per poder tenir uns resultats de les simulacions com més pròxims a la realitat possibles i amb el mínim d'errors.

5.3. Declaració models i mètodes:

La declaració dels models i mètodes utilitzats han sigut de la següent manera:



II-lustració 26. *Valors i paràmetres del model viscos*

- Model de viscositat:

El model escollit en aquest projecte amb l'objectiu d'apropar-se al màxim a valors pròxims a la realitat és el *K-epsilon* el qual aconseguix que el programa *Ansys* tingui en compte les dues equacions de les quals constitueix aquest model que serveixen per representar les propietats turbulentes del flux. ⁽⁴⁾

- Energía cinética turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (Ec. 23)$$

- Disipación turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (Ec. 24)$$

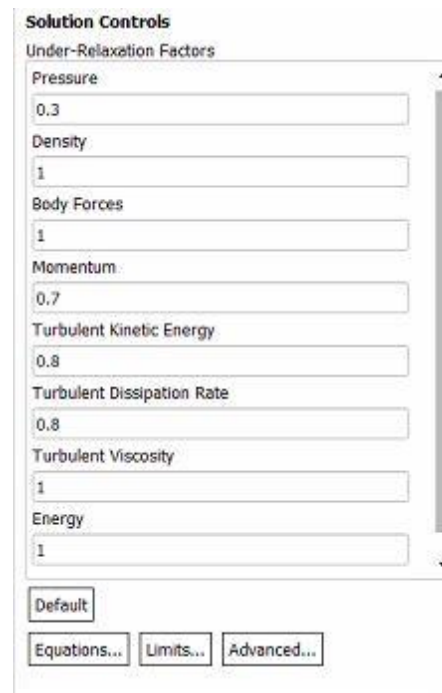
Donde:

- G_k : Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios.
- G_b : Generación de energía cinética debido a la flotabilidad.
- Y_M : Contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible.
- $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k : Constantes determinadas experimentalmente.
- μ_t : Viscosidad turbulenta.
- σ_k : Número de Prandtl en función de k .
- σ_ϵ : Número de Prandtl en función de ϵ .

Il·lustració 27. Equacions de K-epsilon

Adicionalment, com s'observa a la imatge (il·lustració 1) el comportament de les parets contra el fluid és de “no slip” (en la imatge es referència com a “*Standard Wall Functions*”) el qual realitza que el flux tingui una velocitat igual a 0 al costat de les parets.

- Solucions de control:
En aquest apartat és on s'ha pogut activar la característica d'energia per tal que el programa de simulació utilitzi les equacions d'energia per calcular uns resultats més pròxims a la realitat.



Solution Controls

Under-Relaxation Factors

Pressure: 0.3

Density: 1

Body Forces: 1

Momentum: 0.7

Turbulent Kinetic Energy: 0.8

Turbulent Dissipation Rate: 0.8

Turbulent Viscosity: 1

Energy: 1

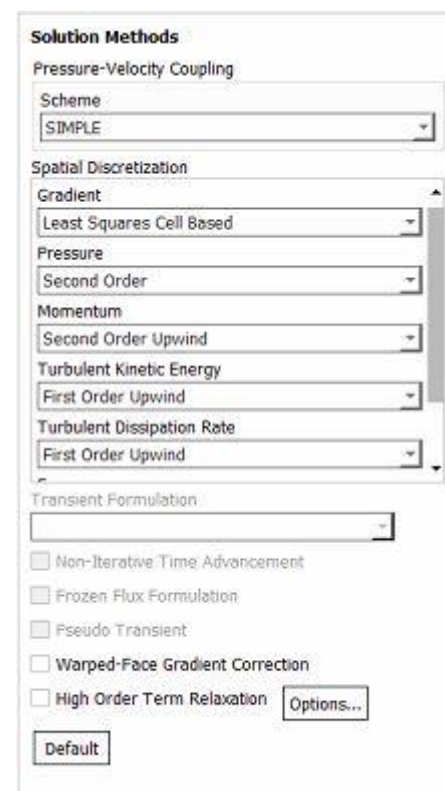
Default

Equations... Limits... Advanced...

Il·lustració 28. Valors de les solucions de control

- Mètodes de solució:
Essencialment el paràmetre que més interessa modificar és el “*momentum*” com es pot observar en la imatge. Els altres paràmetres també són modificables però no realitzen canvis significatius en els resultats.

El “*momentum*” escollit és el “*second order upwind*” el qual fa referència a la resolució hiperbòlica diferencial parcial d'equacions. Altrament, disposem també del primer i tercer ordre d'equacions però un presenta menys precisió i l'altre presenta



Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme: SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient: Least Squares Cell Based

Pressure: Second Order

Momentum: Second Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind

Transient Formulation: Non-Iterative Time Advancement

☐ Non-Iterative Time Advancement

☐ Frozen Flux Formulation

☐ Pseudo Transient

☐ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation

Options...

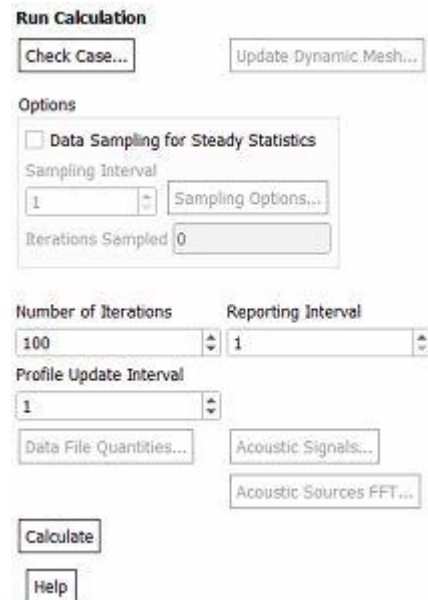
Default

Il·lustració 29. Valors dels mètodes de solució

més inestabilitat respectivament. Per conseqüència, s'ha escollit el segon ordre.

- Paràmetres d'encesa de la simulació:

Com es pot observar en la imatge (il·lustració 30) el nombre d'iteracions que s'han pogut efectuar en els tres models de simulació són 100. No s'ha pogut realitzar un nombre major d'iteracions per causa de les limitacions que presentava l'ordinador. Altrament, no s'ha utilitzat un menor nombre d'iteracions degut a una possible obtenció de resultats poc precisos.

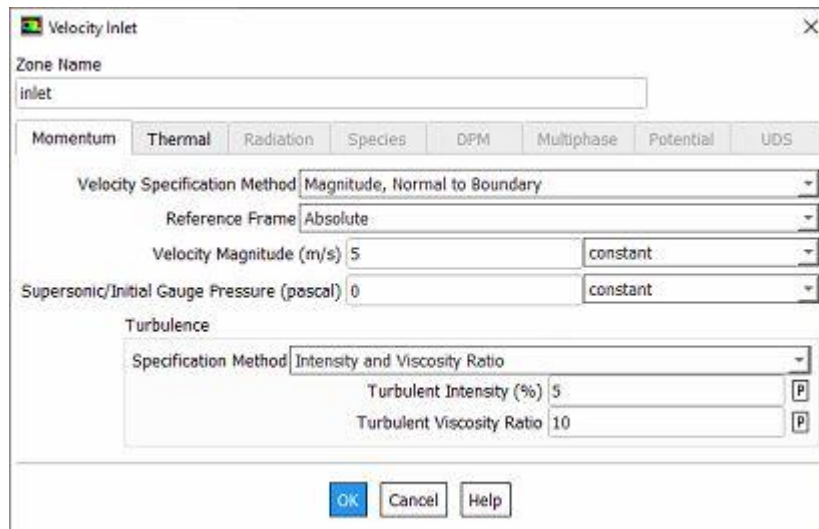


Il·lustració 30. Paràmetres d'encesa

5.4. Condicions de contorn

Les condicions de contorn generals s'han definit de la següent manera:

- Velocitat *Inlet* (5 m/s):
 - Magnitud de la velocitat: 5 m/s
 - Pressió: 0 Pa
 - % Intensitat de turbulència: 5%
 - Ratio de la viscositat turbulenta: 10



Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 5 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

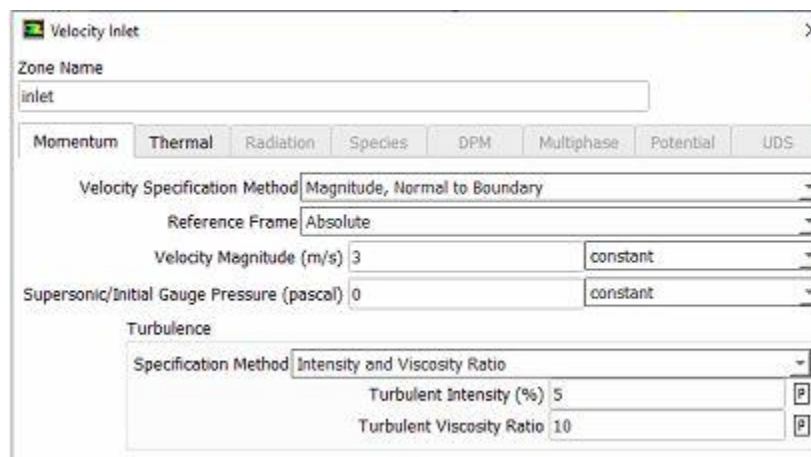
Turbulent Intensity (%): 5 P

Turbulent Viscosity Ratio: 10 P

OK Cancel Help

Il·lustració 31. Valors de la velocitat del “Inlet” a 5m/s

- Velocitat *Inlet* (3 m/s):
 - Magnitud de velocitat: 3 m/s
 - Pressió: 0 Pa
 - % Intensitat de turbulència: 5%
 - Ratio de viscositat turbulenta: 10



Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 3 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

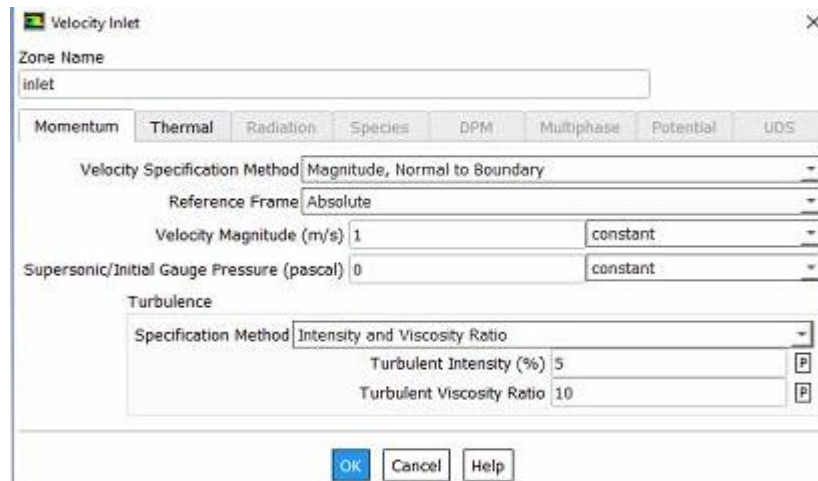
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%): 5 P

Turbulent Viscosity Ratio: 10 P

Il·lustració 32. Valors de la velocitat del “Inlet” a 3m/s

- Velocitat *Inlet* (1 m/s):
 - Magnitud de velocitat: 1 m/s
 - Pressió: 0 Pa
 - % Intensitat de turbulència: 5%
 - Ratio de viscositat turbulenta: 10

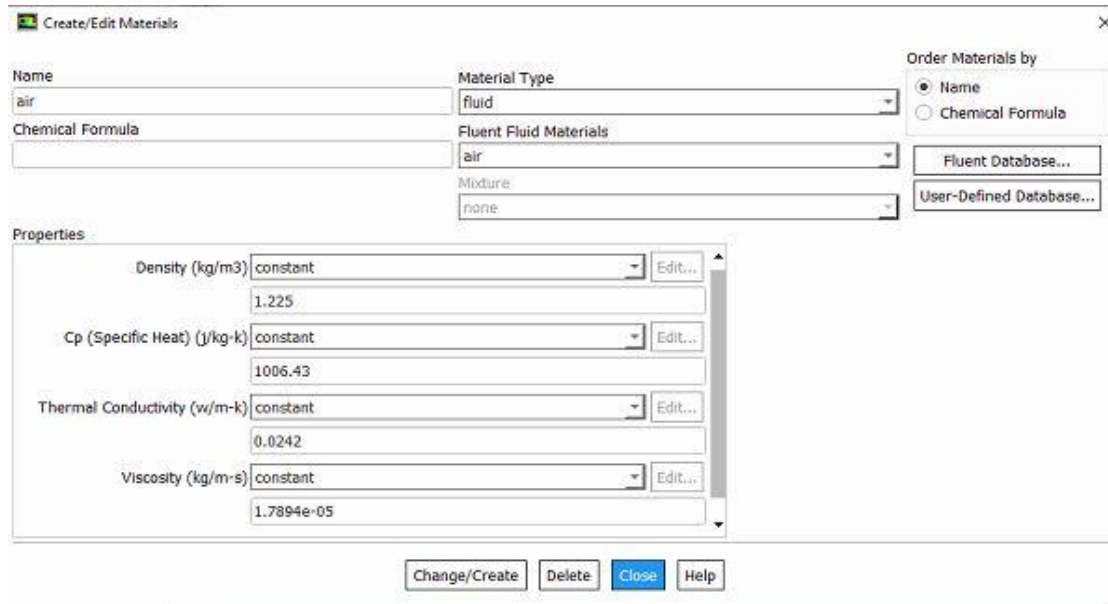


Il·lustració 33. Valors de la velocitat del “Inlet” a 1m/s

5.5. Condicions inicials

Les condicions inicials a tenir en compte en aquest projecte són les velocitats en que s’ha realitzat les diferents proves de simulació, les respectives temperatures ambient, les pressions ambient, la viscositat i les condicions inicials del fluid a estudiar, en aquest cas, l’aire.

Les condicions inicials de l’aire són un factor determinant pel resultat que s’obté ja que variant la densitat i viscositat es poden obtenir resultats amb una àmplia variació. Com s’observa en la imatge (il·lustració 34) els valors escollits són els valors de l’aire en condicions estàndard.



Create/Edit Materials

Name: air

Material Type: fluid

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials: air

Mixture: none

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Fluent Database...

User-Defined Database...

Properties

Density (kg/m ³)	constant	Edit...
	1.225	
Cp (Specific Heat) (J/kg·K)	constant	Edit...
	1006.43	
Thermal Conductivity (W/m·K)	constant	Edit...
	0.0242	
Viscosity (kg/m·s)	constant	Edit...
	1.7894e-05	

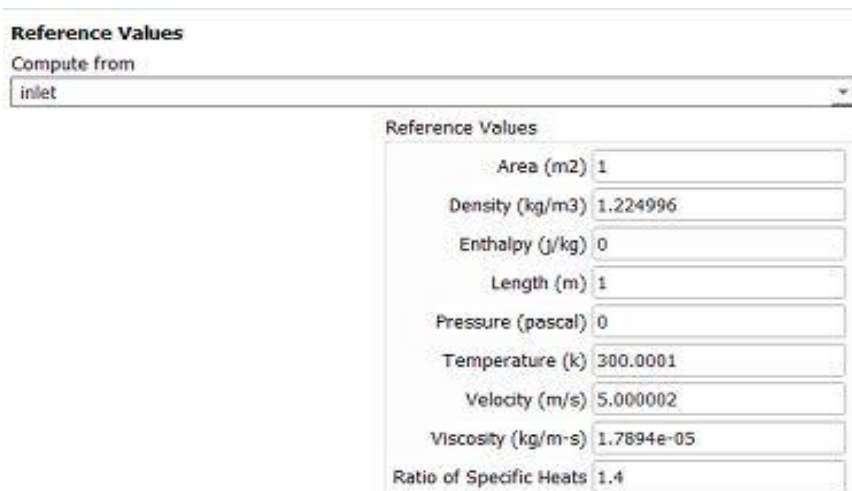
Change/Create Delete Close Help

II·lustració 34. Valors de les condicions inicials de l'aire

- Velocitat *Inlet* 5 m/s:

Com s'observa en la imatge (il·lustració 35) les condicions inicials del primer model de simulació són els que es poden considerar com a condicions estàndard, les quals són:

- Temperatura: 300K
- Entalpia: 0 J/Kg
- Pressió: 0 Pa
- Viscositat (aire): $1'789 \times 10^{-5}$ Kg/m·s
- Densitat d'aire: 1'225 Kg/m³



Reference Values

Compute from: inlet

Reference Values

Area (m ²)	1
Density (kg/m ³)	1.224996
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	300.0001
Velocity (m/s)	5.000002
Viscosity (kg/m·s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

II·lustració 35. Valors de referència 5 m/s

- Velocitat *Inlet* 3 m/s:

Com s'observa en la imatge (il·lustració 36) les condicions inicials del segon model de simulació són els que es poden considerar com a condicions estàndard, les quals són:

- Temperatura: 300K
- Entalpia: 0 J/Kg
- Pressió: 0 Pa
- Viscositat (aire): $1'789 \times 10^{-5}$ Kg/m·s
- Densitat d'aire: $1'225$ Kg/m³

Reference Values

Compute from
inlet

Reference Values	
Area (m2)	1
Density (kg/m3)	1.224996
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	300.0001
Velocity (m/s)	2.999997
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Il·lustració 36. Valors de referència 3 m/s

- Velocitat *Inlet* 1 m/s:

Com s'observa en la imatge (il·lustració 37) les condicions inicials del tercer model de simulació són els que es poden considerar com a condicions estàndard, les quals són:

- Temperatura: 300K
- Entalpia: 0 J/Kg
- Pressió: 0 Pa
- Viscositat (aire): $1'789 \times 10^{-5}$ Kg/m·s
- Densitat d'aire: $1'225$ Kg/m³

Reference Values

Compute from

Reference Values

Area (m2)	1
Density (kg/m3)	1.225
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	1
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

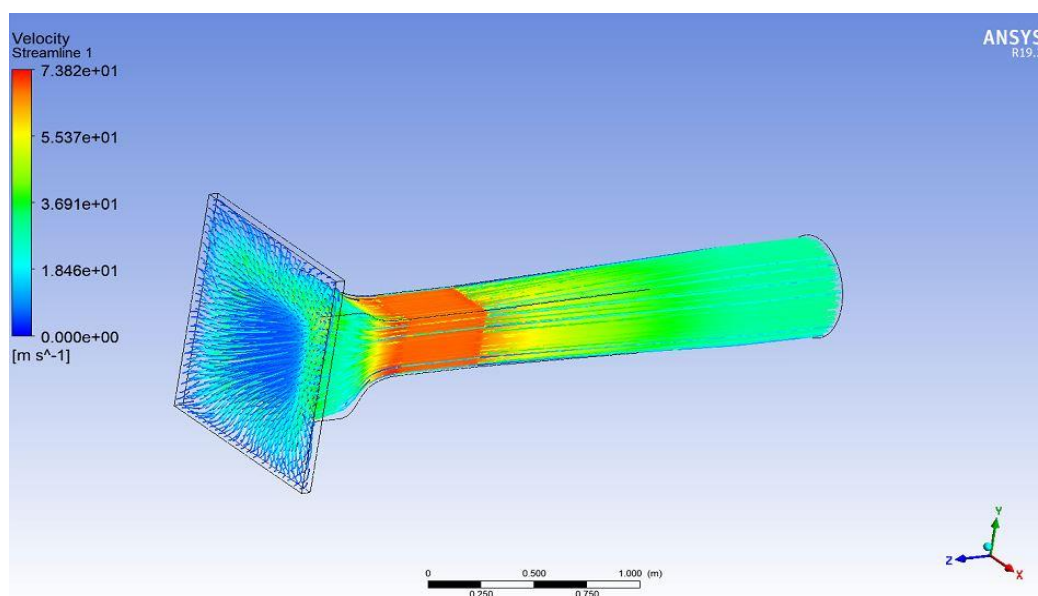
Il·lustració 37. Valors de referència 1 m/s

6. Simulació (post-procés)

6.1. Línies de velocitat per a les diferents velocitats del túnel de vent

En les següents imatges es mostra els resultats de les simulacions a diferents velocitats del “Inlet” i amb una visualització del flux de 100 línies.

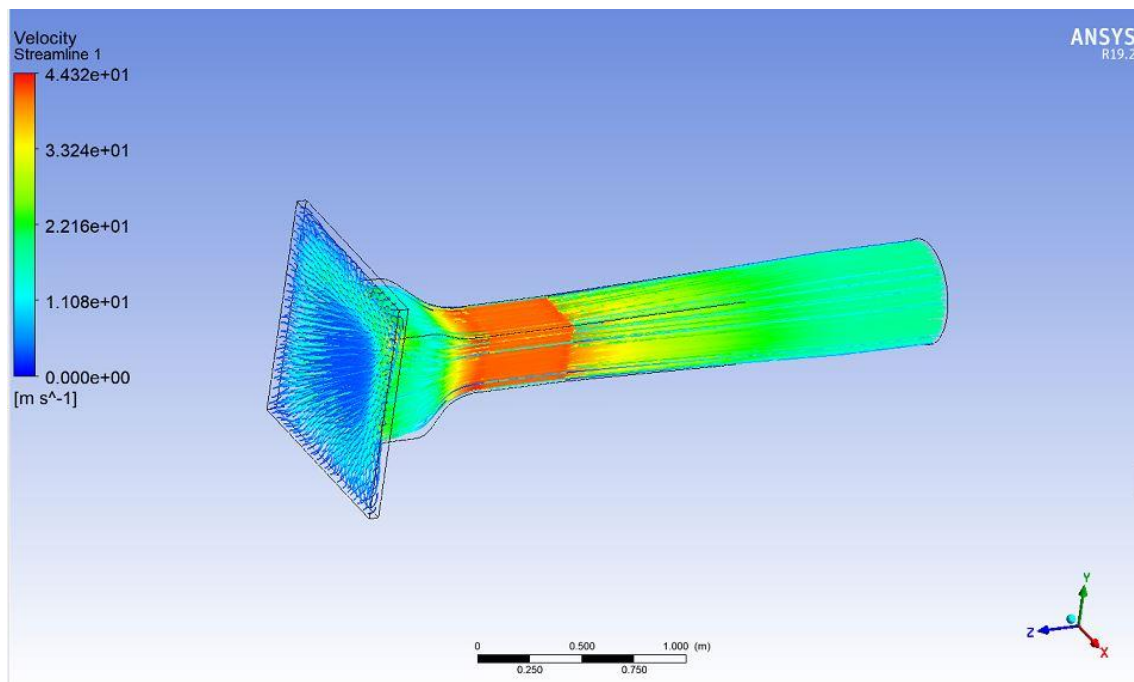
Adicionalment, el resultat és global el qual significa que apareixen les màximes i les mínimes velocitats de la simulació, per aquest motiu s’observa un rang ampli de velocitats.



Il·lustració 38. Resultat 3D velocitats de simulació flux amb “Inlet” = 5 m/s

En la imatge (il·lustració 38) es pot observar la representació de la simulació del túnel de vent obert amb una velocitat de “Inlet” de 5 m/s. Com es pot veure la velocitat de la zona d'estudi és 73'82 m/s per aquest motiu, la velocitat de “Inlet” resultaria errònia ja que provoca una velocitat dins la zona d'estudi superior al rang de velocitats, el qual ha de ser de 3'1 m/s a 28 m/s.

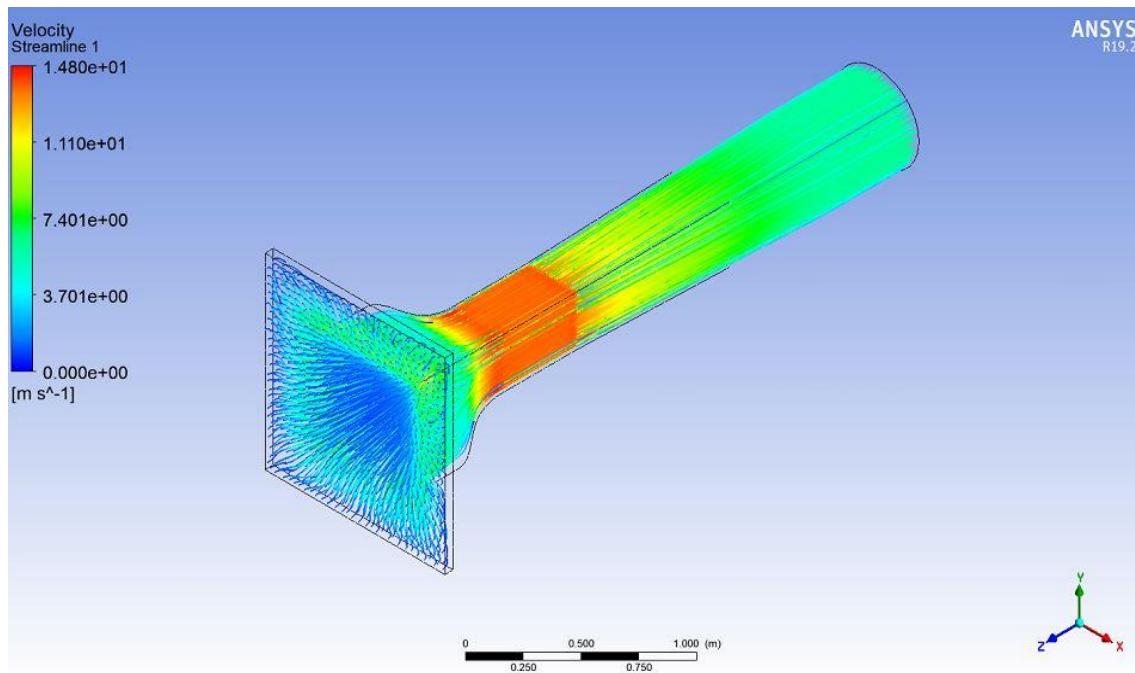
Tanmateix, l'acceleració del fluid és correcte ja que en el punt d'estudi és on tenim les velocitats més altes i també podem observar com el difusor du a terme la seva tasca desaccelerant el fluid adequadament.



Il·lustració 39. Resultat 3D velocitats de simulació flux amb “Inlet” = 3 m/s

En la imatge (il·lustració 39) es pot observar el resultat de la simulació amb una velocitat de “Inlet” de 3 m/s. Com ha succeït en el resultat anterior, aquest tampoc resulta vàlid degut a que no compleix les especificacions esmentades anteriorment, ja que la velocitat en la zona d'estudi és de 44'32 m/s.

Adicionalment, com es pot observar les línies de flux no tenen una gran variació comparant-ho amb el resultat anterior per tant, es pot considerar en que la simulació és correcta tot i que els resultats obtinguts no entrin dins el rang de velocitats desitjades.



Il·lustració 40. Resultat 3D velocitats de simulació flux amb “Inlet” = 1 m/s

En la imatge (il·lustració 40) es pot observar finalment el resultat de la simulació amb una velocitat del “Inlet” de 1 m/s. A diferència dels resultats anteriors en aquest s’obtenen uns valors els quals es troben dins el rang de velocitats desitjat, la velocitat la qual és de 14’80 m/s en la zona d’estudi.

Altrament, observar que el resultat tot i ser l’adequat, les línies de flux són similars als resultats anteriors. Per aquest motiu, es pot donar per vàlides les simulacions anteriors juntament amb aquesta. Tanmateix, s’explica els resultats mostrats en aquesta simulació perquè es considera com al resultat correcte, tot i que també es pot utilitzar en les dues simulacions inicials.

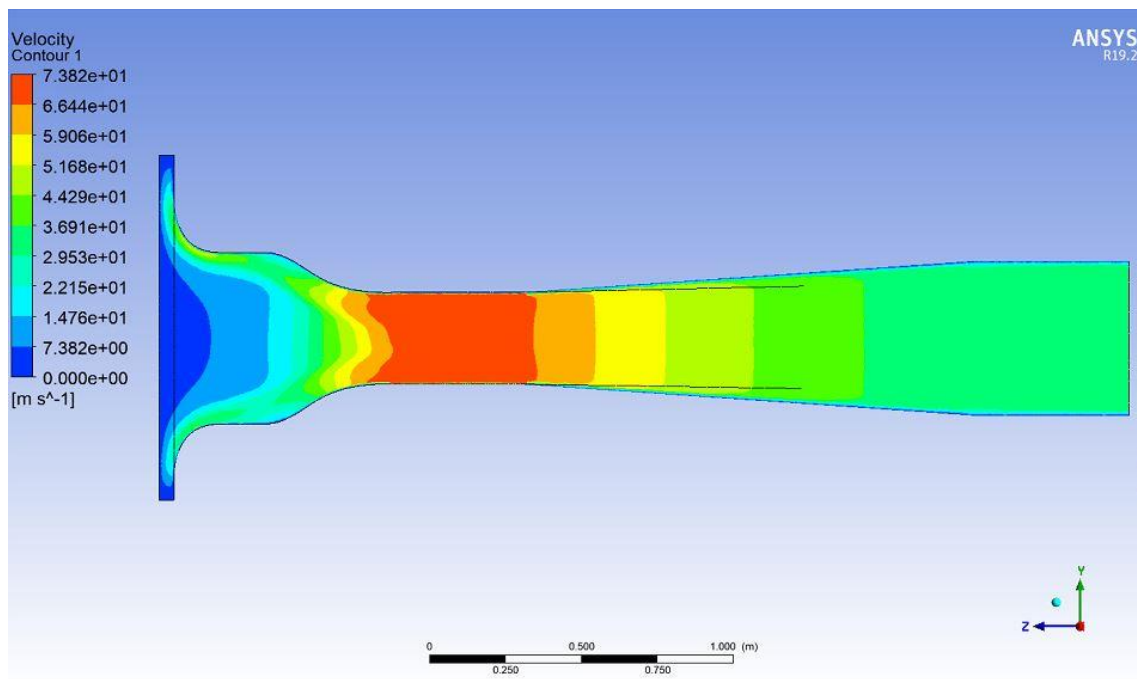
Adicionalment, en aquesta simulació, s'observa en la zona de "*Inlet*" una acceleració progressiva del flux el qual inicialment es troba a velocitat 0 (coloració blava en l'escala de la simulació) i a mesura que avança i es troba amb les parets del concentrador d'aire les línies de flux canvien a una coloració verdosa a causa de l'acceleració que provoca aquest.

Per afegiment, en el punt d'inflexió on passa del concentrador d'aire a zona d'estudi, s'observa un ràpid increment de la velocitat així com expressen les línies de flux canviant de coloració verdosa passant per coloració groga i finalment acabant amb taronja/vermella, indicant d'aquesta manera que la velocitat màxima es troba en la zona d'estudi.

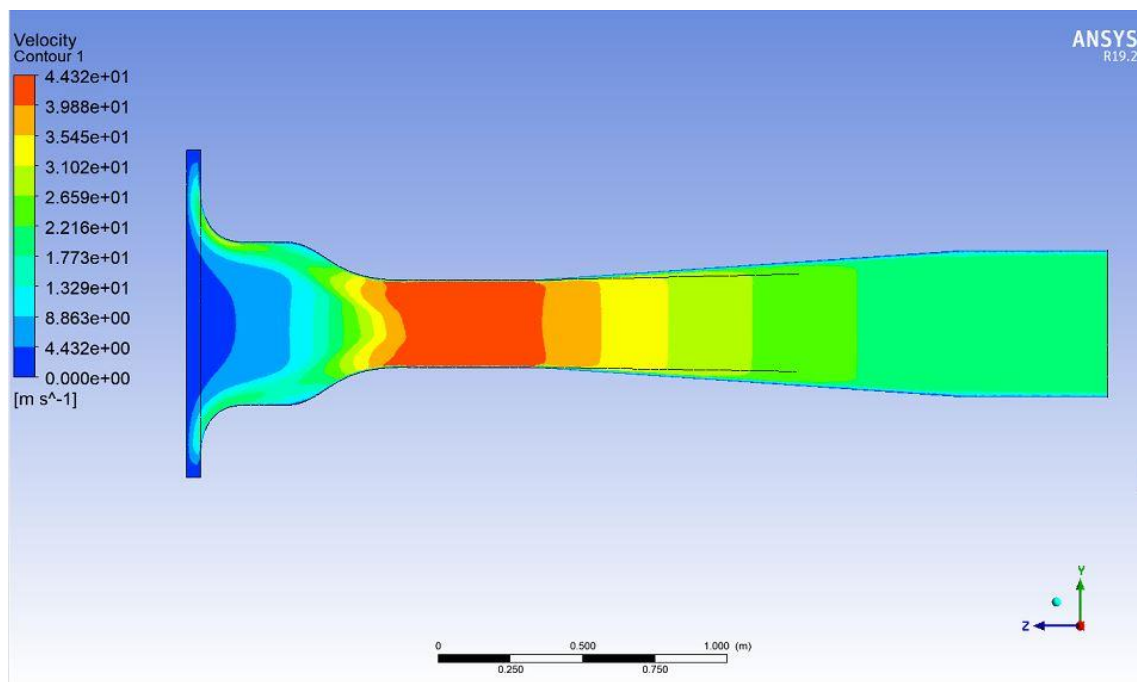
Seguidament, es pot observar com la velocitat de l'aire en la zona d'estudi disminueix gradualment a mesura que avança pel difusor d'aire. Adicionalment es pot visualitzar aquesta disminució gràcies a la coloració la qual passa d'una pigmentació groguenca a una de verdosa, mostrant així la desacceleració del flux d'aire.

6.2. Resultats presentats amb un tall en 2D

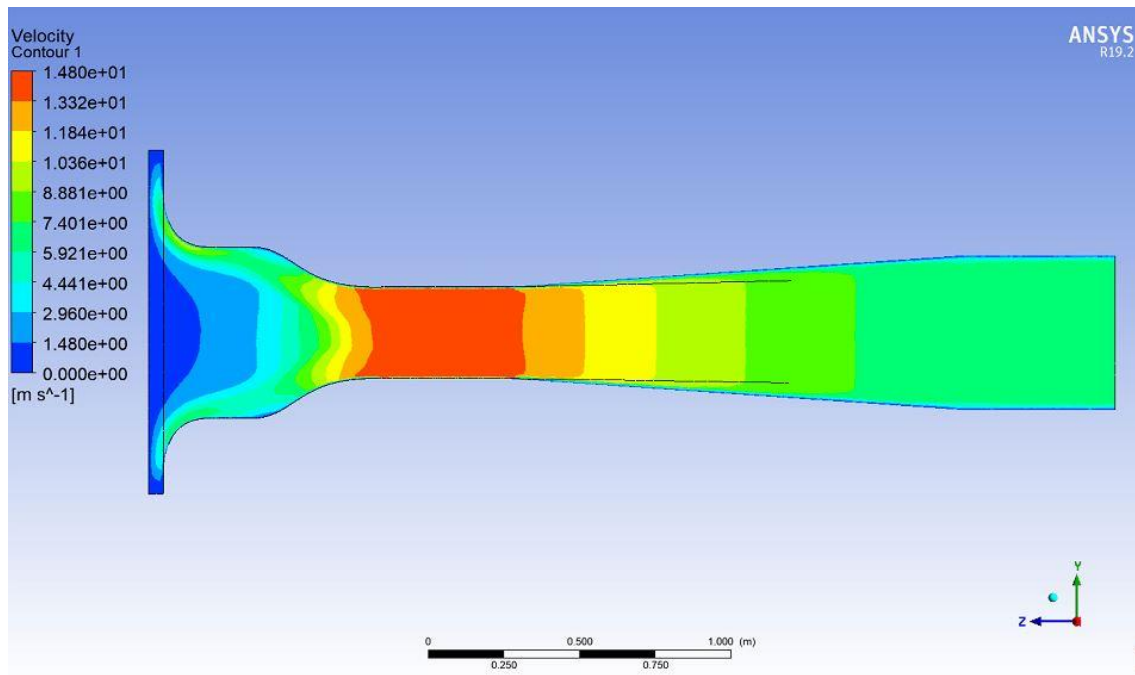
En aquest apartat s'exposen els talls transversals de les velocitats dins del túnel de vent en els diferents models (5, 3 i 1 m/s en el "*Inlet*"), per així tenir una millor comprensió del canvi de velocitats del flux d'aire dins el túnel de vent obert.



Il·lustració 41. Resultat 2D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 5 m/s



Il·lustració 42. Resultat 2D velocitats de simulació flux amb "Inlet" = 3 m/s



Il·lustració 43. Resultat 2D velocitats de simulació flux amb “Inlet” = 1 m/s

Tal i com s’ha realitzat en l’apartat anterior, l’explicació del que succeeix en les imatge anteriors (il·lustracions 41, 42 i 43), es realitza en la ultima imatge (il·lustració 43) ja que els valors són els més correctes per dur a terme l’explicació, tanmateix es pot adequar l’explicació en els altres dos models (il·lustració 41 i 42).

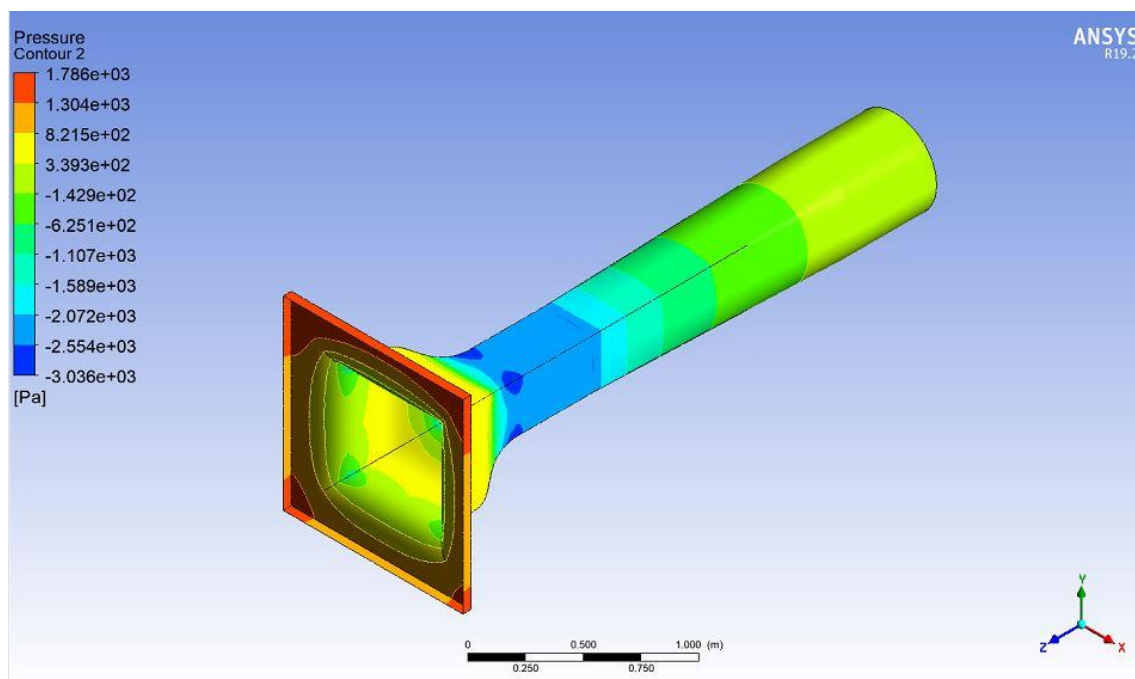
Igual que s’observa en el model de línies de flux en 3D, en la zona del “Inlet” la velocitat és 0 i a mesura que avança pel túnel de vent hi ha una acceleració progressiva fins arribar a la velocitat màxima que es troba a la zona d’estudi (zona taronja/vermella).

Addicionalment, s’aprecia que el procés d’acceleració existeixen unes zones més properes a les parets on s’accelera el flux abans que en la zona central. Aquest fenomen és degut a la geometria del túnel de vent i un cop arriba a la secció hexaèdrica de la zona d’estudi, aquest fenomen desapareix. Tanmateix, en arribar a la zona d’estudi el flux és estable i laminar per així poder tenir una millor visualització de les línies d’aire que afecten al cos situat dins la zona d’estudi (en el moment on s’estudiï un objecte dins el túnel).

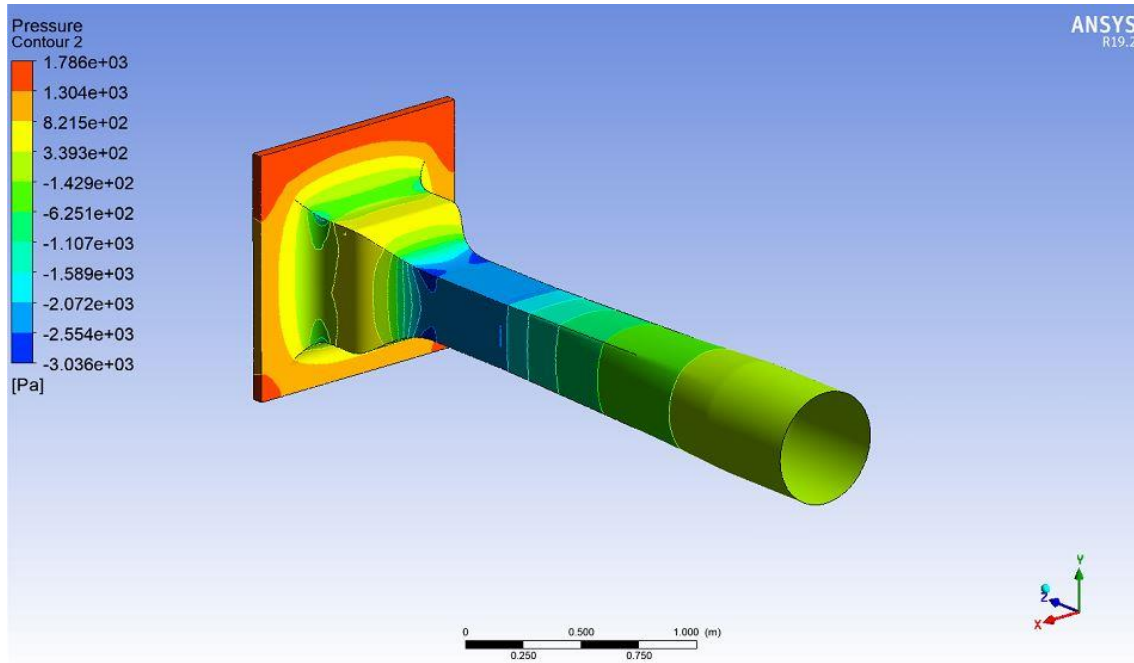
Seguidament, es pot observar com el flux a l'hora de desaccelerar-se a la zona del difusor d'aire ho realitza de manera progressiva i constant com s'observa en els canvis de coloració en el tall transversal del resultat de la simulació fins arribar a una velocitat de seguretat.

6.3. Contorns de pressió a diferents velocitats

El punt següent tracte d'explicar la relació que hi ha entre la velocitat que hi ha dins el túnel de vent i les pressions de contorn que aquest suporta.



Il·lustració 44. Frontal del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 5 m/s



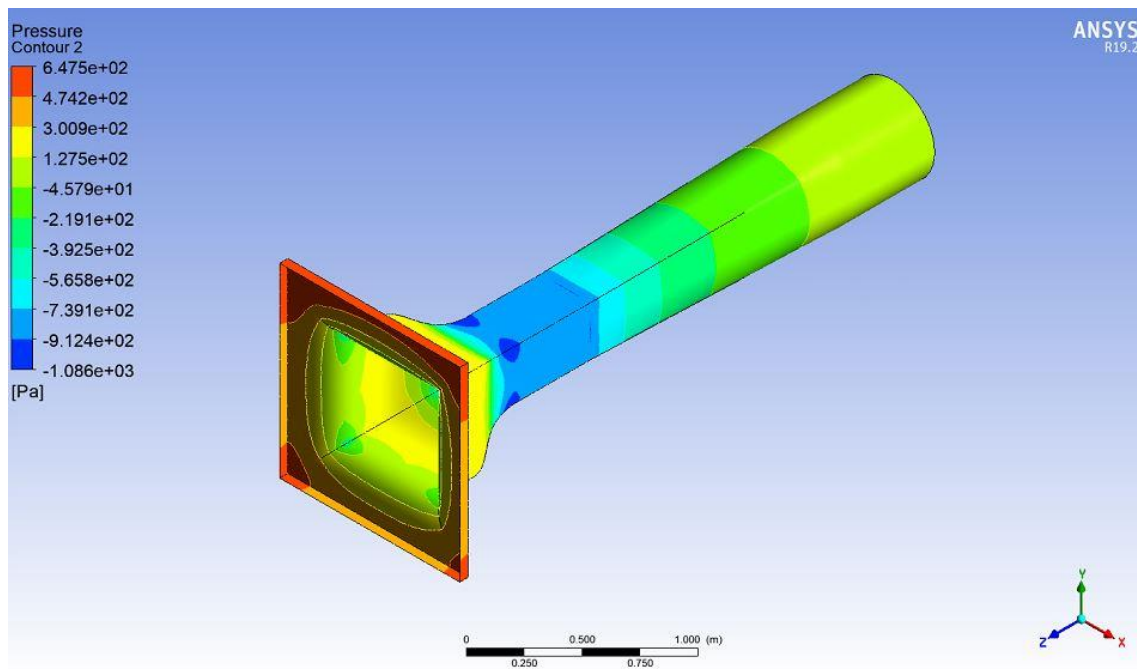
Il·lustració 45. Posterior del resultat 3D de les pressions del “Inlet” = 5 m/s

En les dues imatges anteriors, (il·lustracions 44 i 45), representen les pressions en el túnel de vent quan aquest té una velocitat en el “Inlet” de 5 m/s.

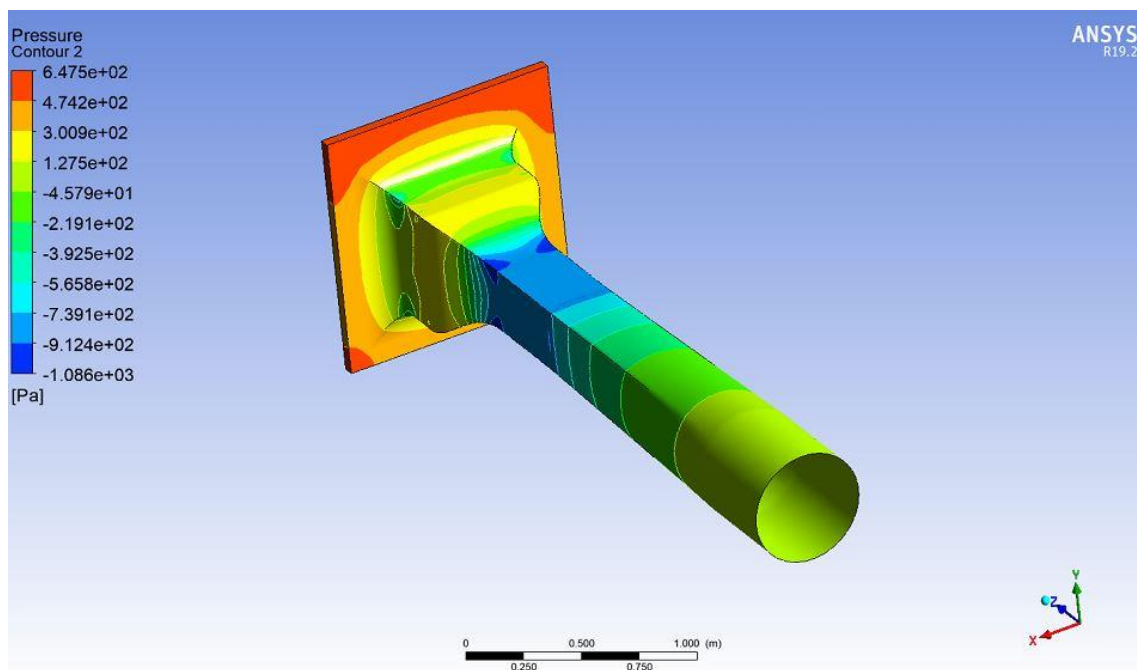
Tal i com s’observa les pressions més elevades es troben en els extrems del petit hexaedre que es fa servir com a zona d’aire en repòs ja que consta d’angles molt rectes, tot i això també s’observa que la part frontal del concentrador d’aire obté un valors elevats de pressió ja que és per on l’aire s’està redirigint amb major força. Addicionalment, la següent zona on hi ha un valors elevats de pressió és on es forma el con de concentració, és així ja que també està redirigint el flux d’aire.

Altrament, s’observa que la zona on hi ha menys pressió és a la zona d’estudi, això és degut a que és la zona on hi ha més velocitat del flux per tant genera la mínima pressió contra les parets del túnel de vent.

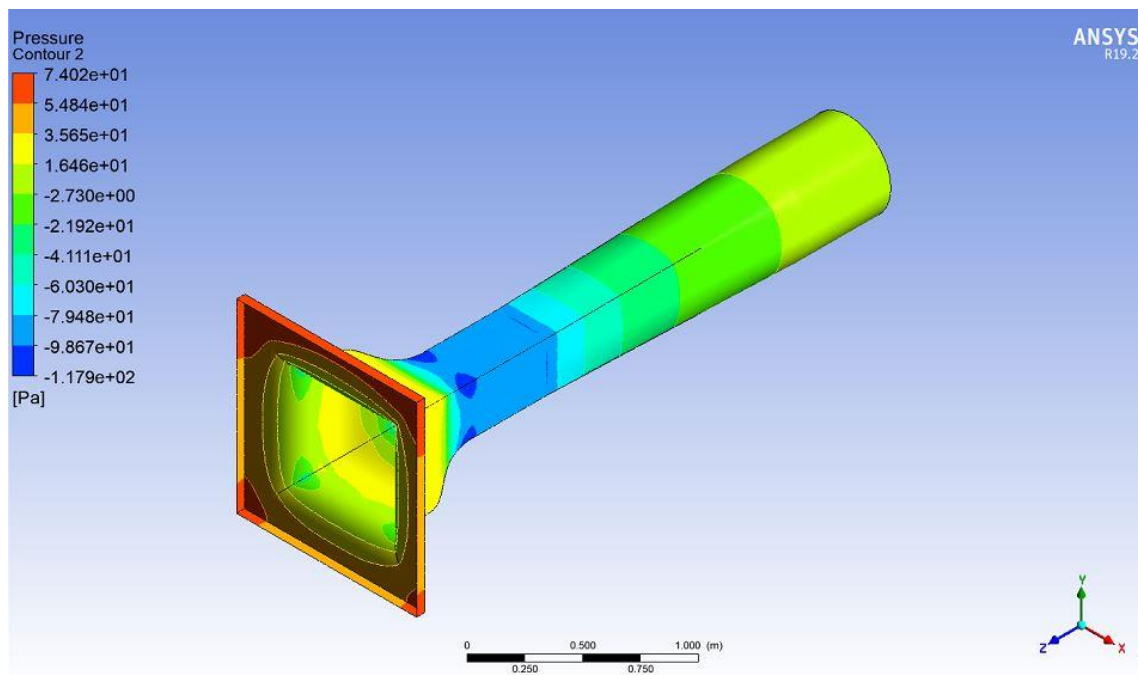
Tot seguit es pot observar que a mesura que el flux va entrant a la zona del difusor d’aire, la coloració ens indica que augmenta la pressió contra les parets del túnel de vent ja que a mesura que la secció s’engrandeix i la velocitat del flux va disminuint, aquest exerceix força contra les parets per poder dissipar la velocitat que portava.



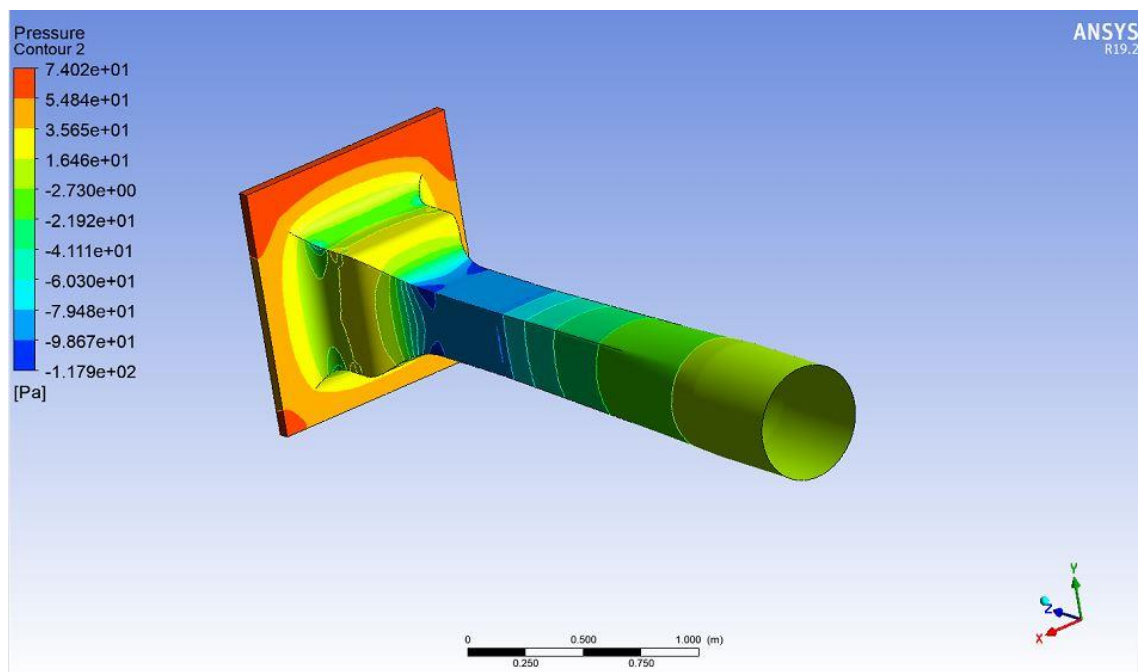
Il·lustració 46. Frontal del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 3 m/s



Il·lustració 47. Posterior del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 3 m/s



Il·lustració 48. Frontal del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 1 m/s



Il·lustració 49. Posterior del resultat 3D de les pressions del "Inlet" = 1 m/s

Pel que fa a les imatges anteriors (il·lustracions 46 - 49), l'únic valor que es modifica és la velocitat del “*Inlet*” perquè el model de túnel de vent sempre és el mateix. D'aquesta manera podem observar que les zones de pressions són exactes entre els tres models.

La única variable que difereix entre els tres casos és el valor nominal de la pressió, el qual es pot observar que en el cas del model que té un “*Inlet*” de 5 m/s és el major dels tres casos i oposadament el model que té un “*Inlet*” de 1m/s obtenim els valors més baixos de pressions.

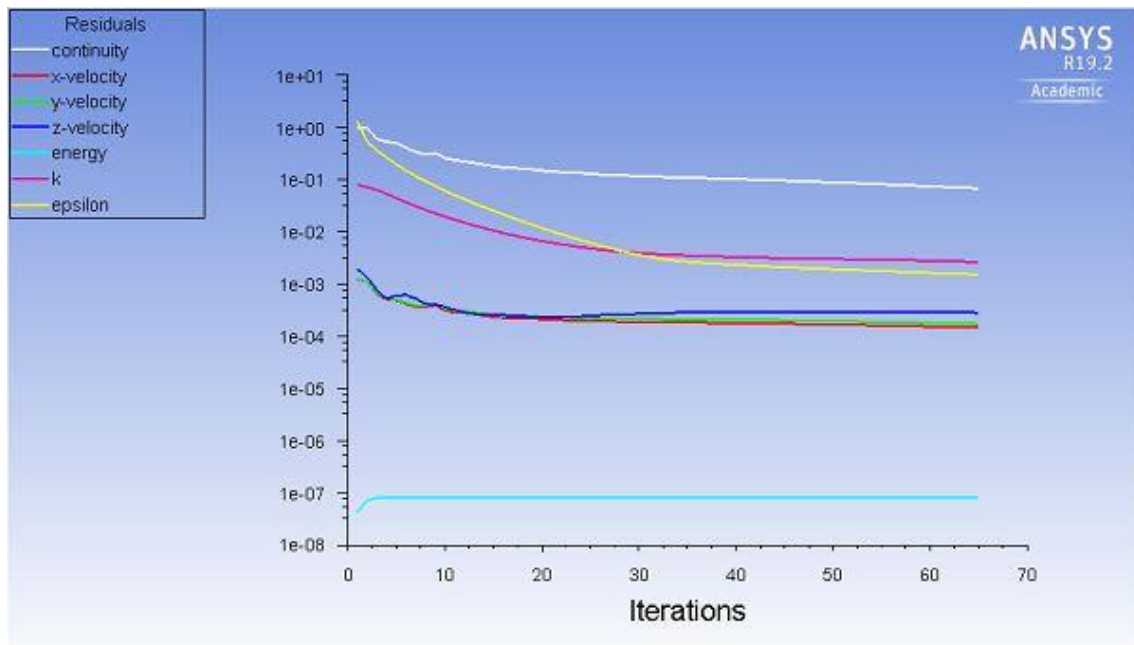
Per aquest motiu podem donar com a vàlida la simulació de les pressions de contorn, ja que només variant la velocitat d'entrada s'han obtingut les mateixes zones de pressió però a diferents valors depenent d'aquesta.

6.4. Scaled residuals

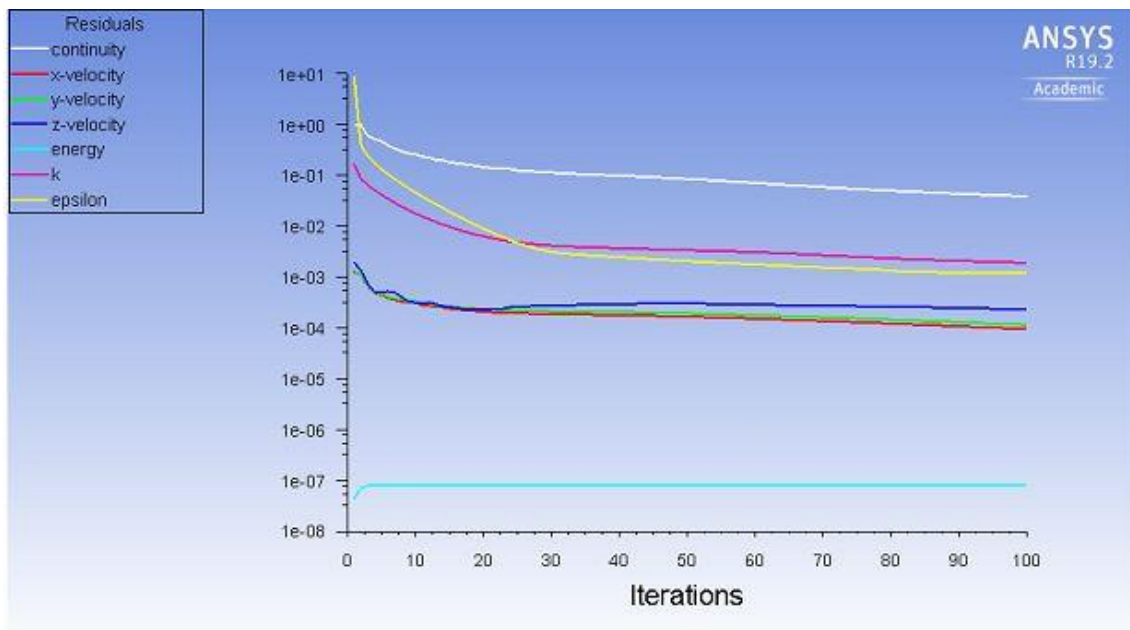
El “*Scaled residual*” és una de les mesures més fonamentals d'una solució amb iteracions, ja que ens permet calcular l'error en la solució del sistema d'equacions.

En una anàlisi de CFD, el residu mesura el desequilibri local d'una variable conservada a cada volum de control, el qual significa que cada cel·la del model tindrà el seu propi valor residual per a cadascuna de les equacions que es resolguin. ⁽⁵⁾

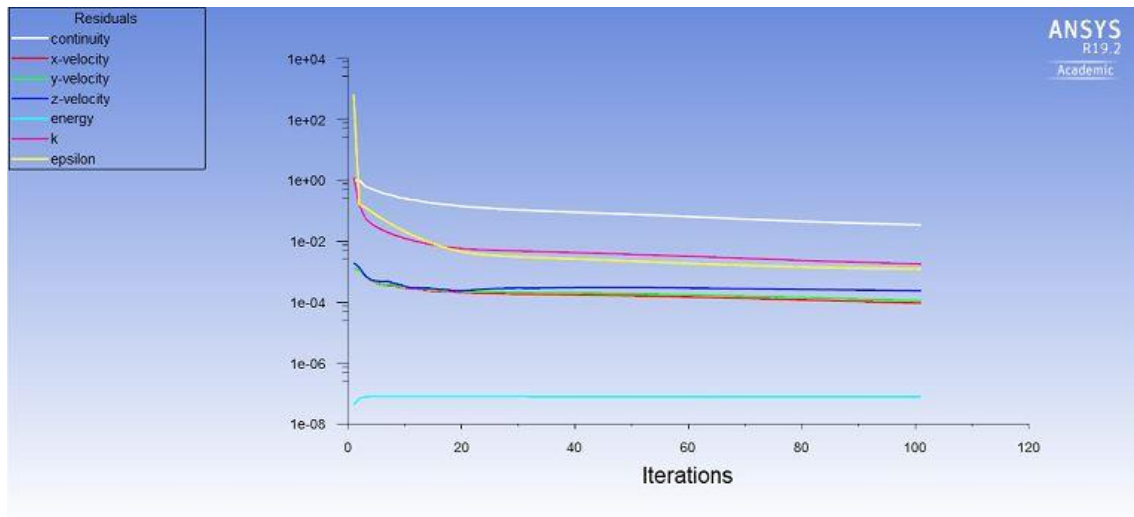
Per tant, el “*Scaled residuals*” que s'han pogut mesurar en la simulació són els següents:



Il·lustració 50. “Scaled residuals” amb la simulació a 5m/s (Inlet)



Il·lustració 51. “Scaled residuals” amb la simulació a 3m/s (Inlet)



Il·lustració 52. “Scaled residuals” amb la simulació a 1m/s (Inlet)

Com s’observa en les imatges anteriors (il·lustracions 50, 51 i 52) els resultats residuals son molt semblants entre els tres models. Com a punt a destacar, s’observa que l’energia (“energy”) té un valor aproximat de $1E-7$ el qual es manté constant al llarg de les iteracions, això és degut a que l’energia en aquest cas és una equació constant, per tant l’error és mínim.

Per altre banda, les dues equacions importants a observar són les de *k-epsilon* les quals com s’observa tenen els valors més elevats d’errors, això

La diferència que s’hi pot observar és que el model amb el “Inlet” correcte (il·lustració 52 amb 1 m/s), els errors disminueixen abans. Tanmateix, s’ha de tenir en compte que els resultats obtinguts són a partir de 100 iteracions i que si s’haguessin realitzat un nombre més elevat d’iteracions, segons la tendència dels resultats, haguéssim obtingut uns valors menors en els errors.

Altrament, esmentar que en el cas del CFD, es considera que uns nivells residuals de $1E-4$ són poc convergents, es consideren que uns nivells de $1E-5$ són bon convergents i es considera que uns nivells de $1E-6$ són molt convergents. No obstant això, per a problemes complicats, com és el cas estudiat, no sempre és possible assolir nivells residuals tan baixos com $1E-6$ o fins i tot $1E-5$.⁽⁵⁾

7. Conclusions

La realització d'aquest projecte ha aportat una gran quantitat de coneixements del món de la aerodinàmica, de la mecànica de fluids i dels softwares tant de disseny en 3D com de CFD que s'utilitzen per poder aproximar el màxim possible els resultats a la realitat. Addicionalment, la gran complexitat i l'ampli rang d'aplicacions del software utilitzat per dur a terme les simulacions, ANSYS, ha suposat un nombre considerablement alt d'hores tant per aprendre a utilitzar-lo com per a dur a terme la definició prèvia del model.

No obstant, els resultats obtinguts de les simulacions han permès tenir una visualització detallada de com es comporta un flux d'aire en contacte amb altres cossos (en aquest cas, el túnel de vent), també ha permès una millor comprensió de quina magnitud són capaços d'accelerar l'aire aquest tipus d'instal·lacions i de la gran varietat que tenen per poder fer proves experimentals.

En finalitzar aquest projecte, es pot observar clarament que s'han complert tots els objectius fixats al principi d'aquest, ja que s'ha fet un disseny satisfactori d'un túnel de vent de circuit obert subsònic, un disseny específic per poder dur a terme les simulacions dins del software de ANSYS. S'ha pogut dissenyar una bancada on poder situar el túnel de vent, s'han realitzat els plànols acotats de totes les peces implicades i s'han realitzat les renderitzacions per així tenir una visió més detallada de com seria el model a la realitat.

Tanmateix, tot i que en l'apartat de limitacions s'ha esmentat que no es faria un estudi de la part electrònica ni s'implementaria el "*Honeycomb*", es creu convenient com a punts a millorar per algun futur treball i per tant, es deixa total llibertat per recrear i continuar amb el model descrit implementant tant la part electrònica com la part d'addicionar l'esmentat "*Honeycomb*".

8. Bibliografia

1. Norma acotació UNE22768 (ISO2768) [Internet]. [Consulta: 10/12/2019] Disponible a: [http://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/?k=\(i:1704010\)](http://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/?k=(i:1704010))
2. Tipus de tunel de vent de Nasa.Gov [Internet]. [Consulta: 24/08/2019] Disponible a: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>
3. ANSYS FLUENT 13 User's Guide. Ansys Fluent Theory Guide. ANSYS Inc, USA. 2013;15317(November):724–46. [Consulta: 09/09/2019]
4. Grupo Termotecnia. Fluidodinámica Computacional. 2016;18. [Consulta: 26/09/2019]
5. Criteris de convergència CFD [Internet]. [Consulta: 07/11/2019] Disponible a: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9296/3-Criteria-for-Assessing-CFD-Convergence.aspx>
6. Empresa venedora de cargols philips. [Internet] [Consulta: 06/12/2019] Disponible a: <https://www.monotaro.sg/p/41690205/>
7. ISO cargol philips. [Internet] [Consulta: 05/12/2019] Disponible a: http://nfgab.se/en/fasteners/3_threaded-bars-carriage-bolts-and-machine-screws/301_machine-screws-cross-head/1328_phillips-oval-countersunk-head-machine-screws-form-iso-7047/
8. Model de túnel de vent obert del institut Von Karman [Internet] [Consulta: 15/08/2019] Disponible a: <https://www.vki.ac.be/index.php/research-consulting-mainmenu-107/facilities-other-menu-148/low-speed-wt-other-menu-151/59-low-speed-wind-tunnel-l-2a>
9. Equacions bàsiques del CFD [Internet] [Consulta: 27/11/2019] Disponible a: https://cfd-online.com/Wiki/Approximation_Schemes_for_convective_term_-_structured_grids_-_Common#Basic_Equations_of_CFD
10. Rodes de "heavy duty" per a bancada de Alibaba [Internet] [Consulta: 26/10/2019] Disponible a: https://www.alibaba.com/product-detail/DLPO-Heavy-duty-304ss-frame-bracket_62367902685.html?spm=a2700.themePage.1021804975149.1.42385d284nE4WE
11. Model Túnel de vent de circuit obert empresa GUNT [Internet] [Consulta: 21/06/2019] Disponible a: <https://www.gunt.de/en/products/open-wind-tunnel/070.17000/hm170/glct-1:pa-148:pr-769>
12. Buscador de túnels de vent de la NASA [Internet] [Consulta: 27/07/2019] Disponible a: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19890004382>
13. Definició de túnel subsònic i transsònic [Internet] [Consulta: 29/07/2019] Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Subsonic_and_transonic_wind_tunnel#Transonic_tunnel

9. Annexos

Annex 1: Assembly Complet Projecte Túnel de Vent Obert

Annex 2: Túnel de vent de circuit obert

Annex 3: Assembly bancada del túnel de vent

Annex 4: Concentrador d'aire

Annex 5: Difusor d'aire

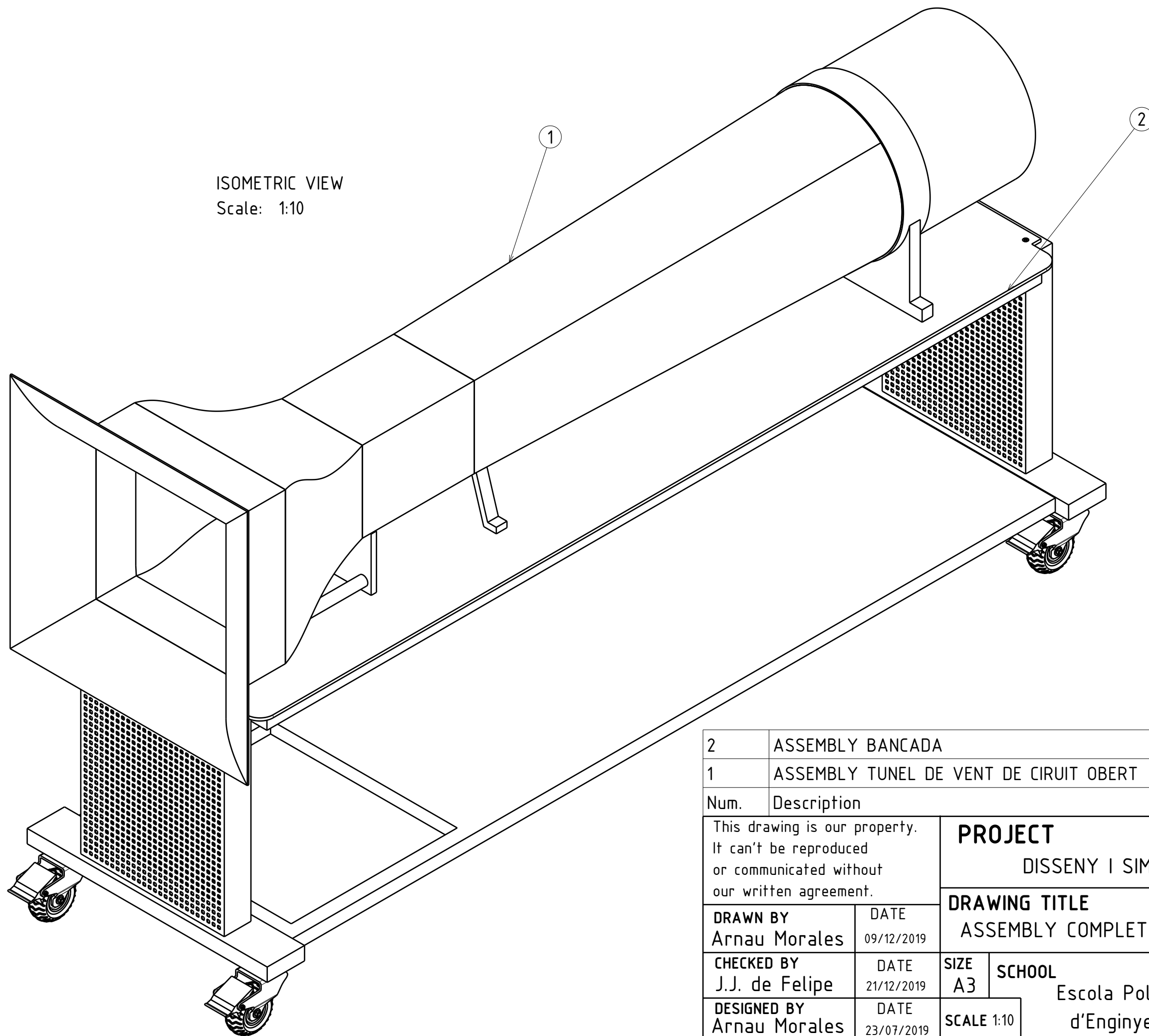
Annex 6: Taula superior bancada túnel de vent

Annex 7: Lateral bancada túnel de vent

Annex 8: Colze de reforç bancada túnel de vent

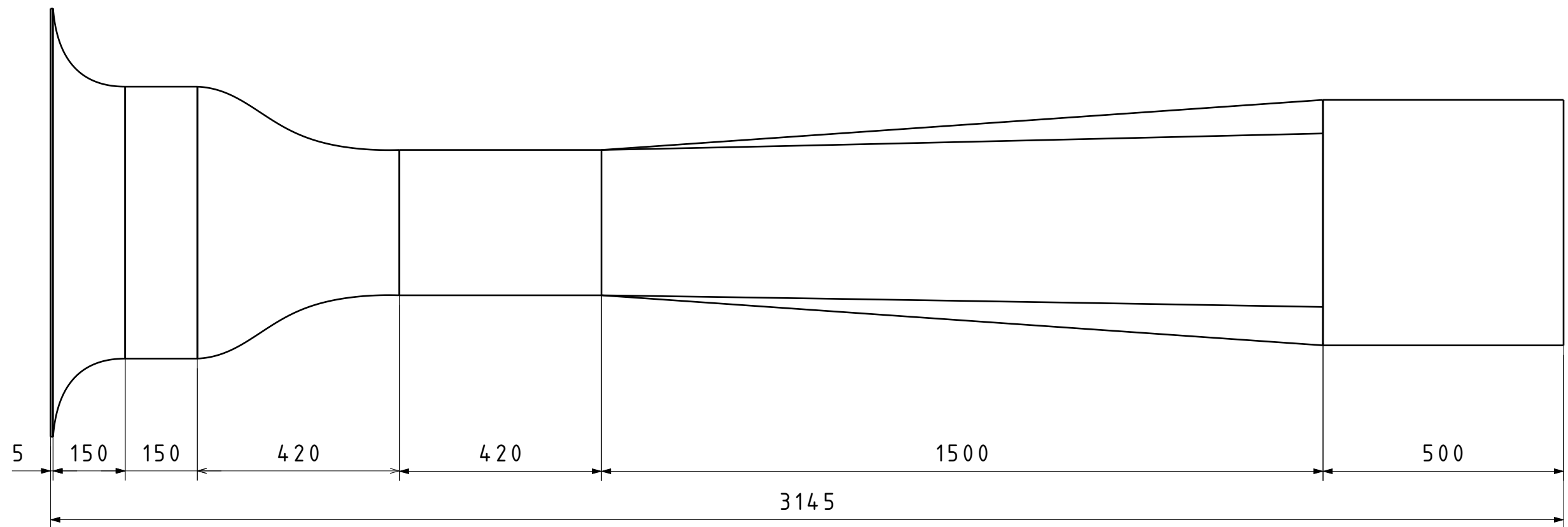
Annex 9: Suport rodes bancada túnel de vent

Annex 10: Taula inferior túnel de vent

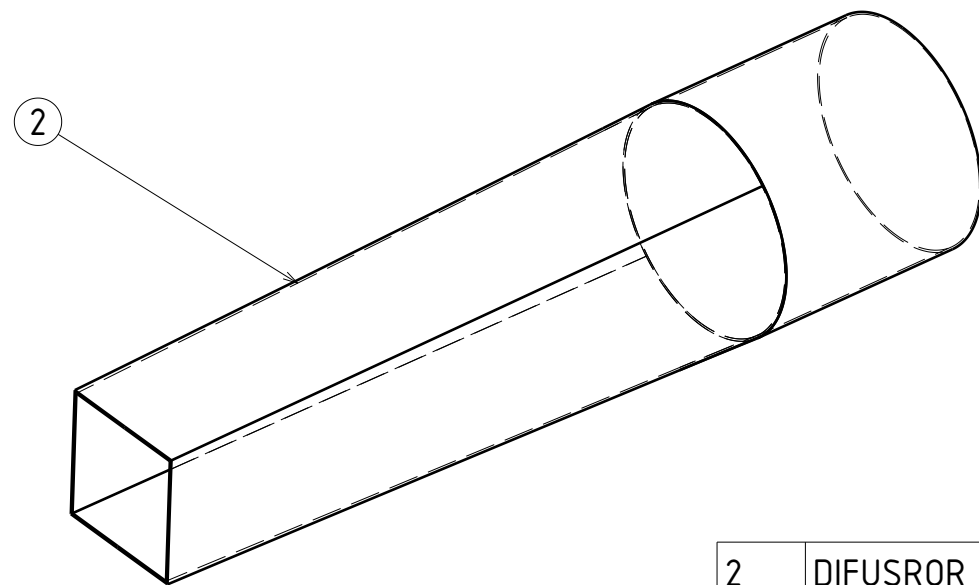
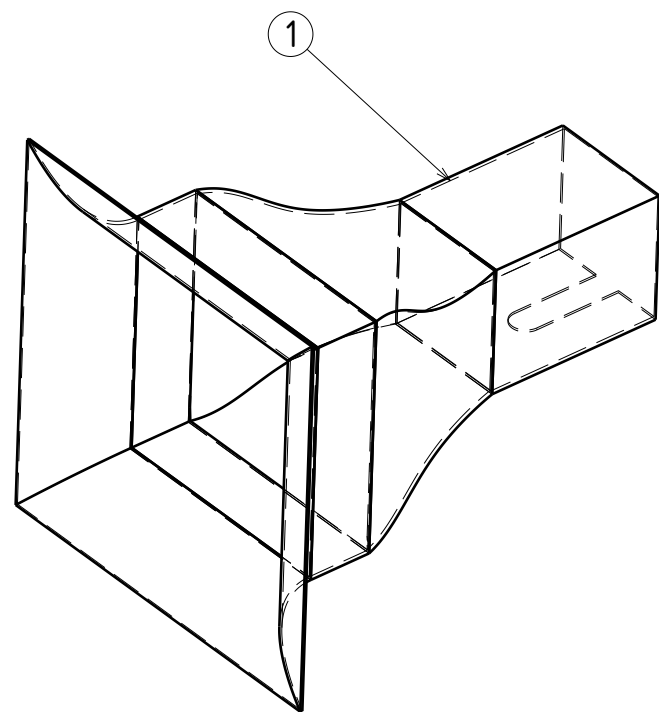


ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:10

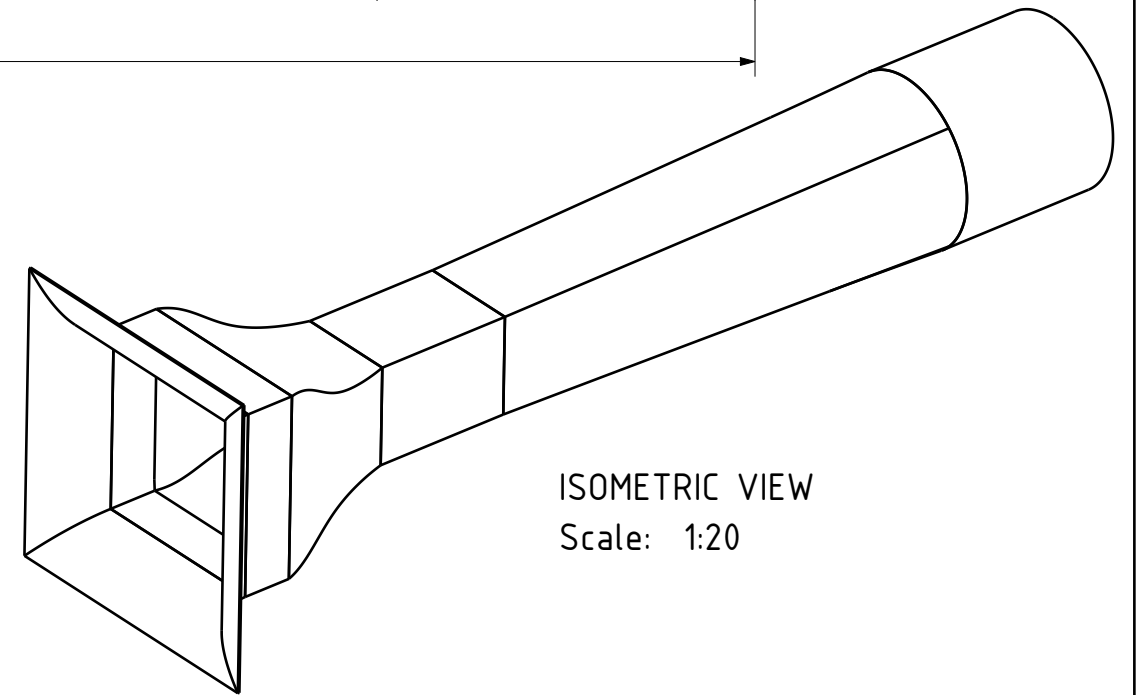
2	ASSEMBLY BANCADA			1
1	ASSEMBLY TUNEL DE VENT DE CIRUIT OBERT			1
Num.	Description			Qt.
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT		
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT		
DRAWN BY Arnau Morales		DATE 09/12/2019		DRAWING TITLE ASSEMBLY COMPLET PROJECTE TUNEL DE VENT OBERT
CHECKED BY J.J. de Felipe		DATE 21/12/2019		SIZE A3
DESIGNED BY Arnau Morales		DATE 23/07/2019		SCHOOL Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa
		SCALE 1:10	UNITS mm	REV A
		UPC		
		SHEET 1/1		



EXPLODED VIEW
Scale: 1:15

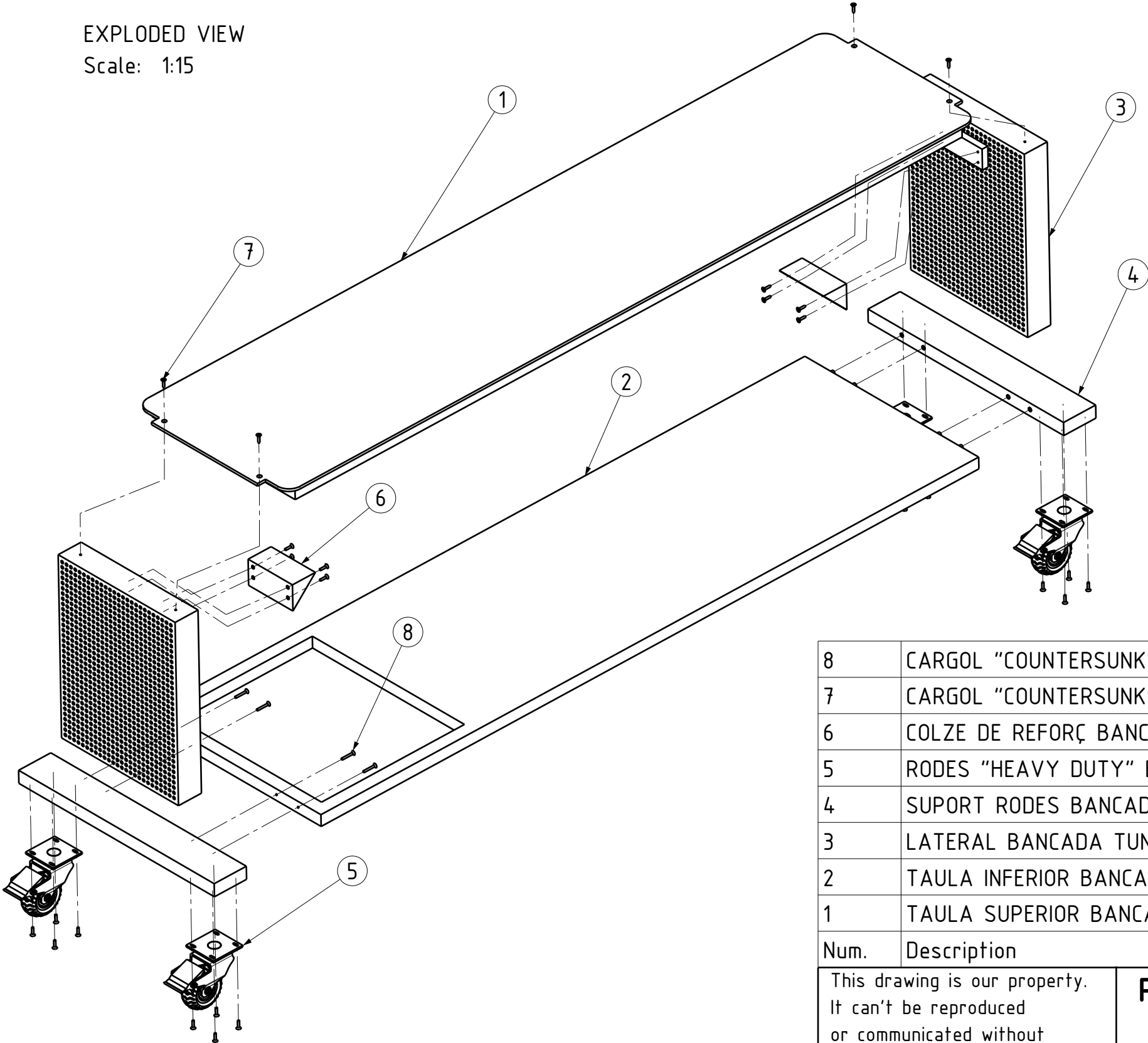


ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:20



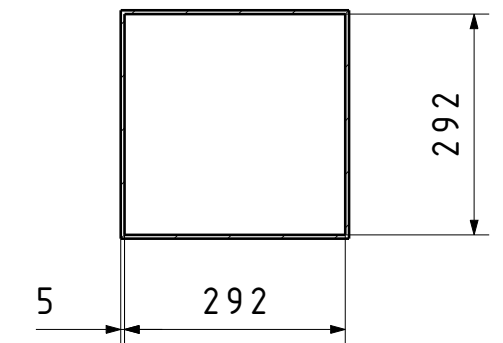
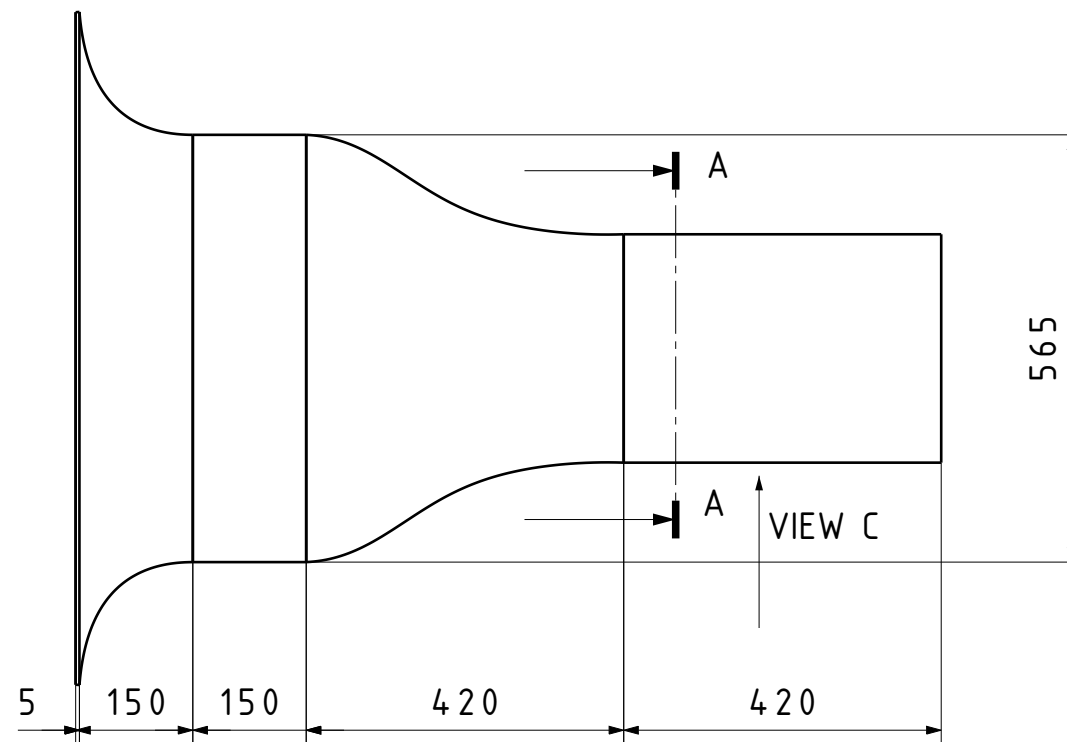
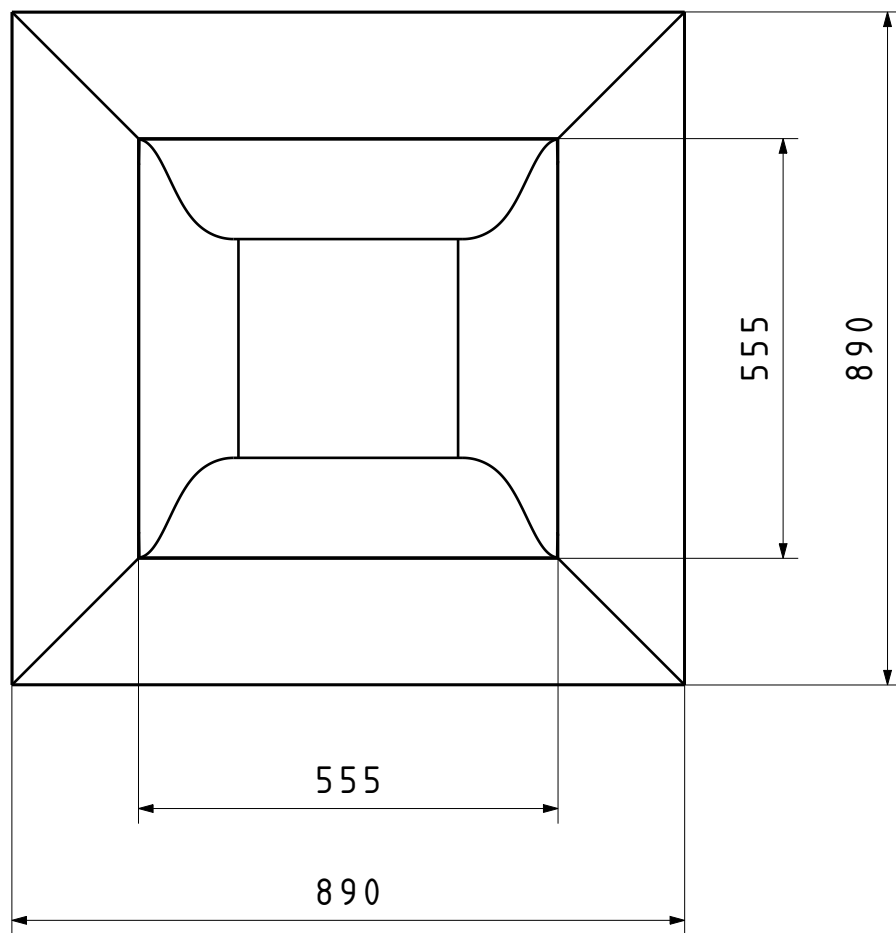
2	DIFUSOR D'AIRE			1
1	CONCENTRADOR D'AIRE			1
Num.	Description			Qt.
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT		
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT		
DRAWN BY Arnau Morales		DATE 09/12/2019		DRAWING TITLE
CHECKED BY J.J. de Felipe		DATE 21/12/2019		SIZE A3
DESIGNED BY Arnau Morales		DATE 23/07/2019		
		SCALE 1:10		UNITS mm
				SHEET 1/1
				REV A
				UPC
				Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC
				UPC

EXPLODED VIEW
Scale: 1:15

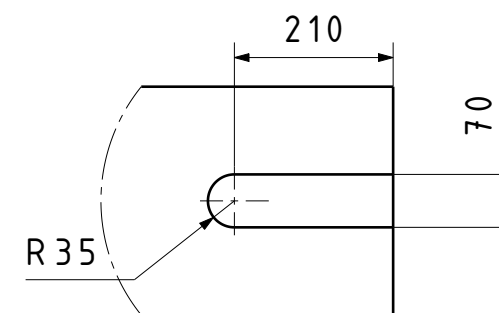


8	CARGOL "COUNTERSUNK" M8x50 (PHILLIPS HEAD, ISO7047)	4
7	CARGOL "COUNTERSUNK" M8x20 (PHILLIPS HEAD, ISO7047)	28
6	COLZE DE REFORÇ BANCADA TUNEL DE VENT	2
5	RODES "HEAVY DUTY" BANCADA (DLPO Heavy duty 304ss)	4
4	SUPORT RODES BANCADA TUNEL DE VENT	2
3	LATERAL BANCADA TUNEL DE VENT	2
2	TAULA INFERIOR BANCADA TUNEL DE VENT	1
1	TAULA SUPERIOR BANCADA TUNEL DE VENT	1
Num.	Description	Qt.

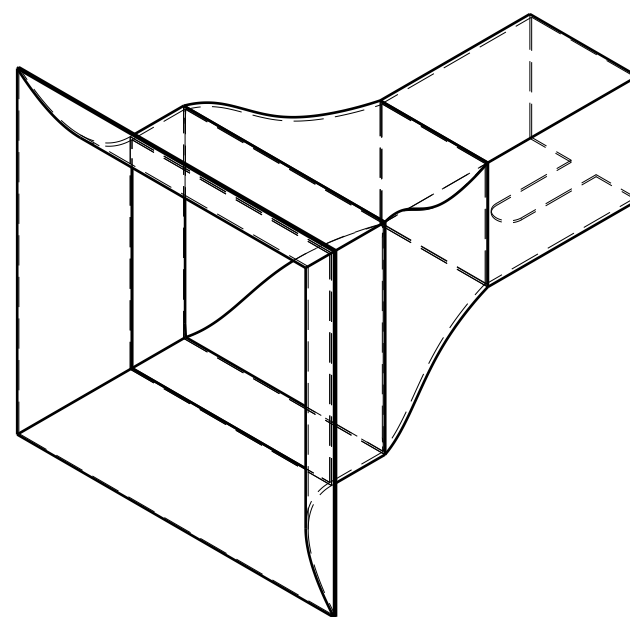
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT			
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
DRAWN BY		DRAWING TITLE			
Arnau Morales		ASSEMBLY BANCADA DEL TUNEL DE VENT			
CHECKED BY		DATE		SIZE	
J.J. de Felipe		09/12/2019		A3	
DESIGNED BY		DATE		SCALE	
Arnau Morales		21/12/2019		1:10	
				SCHOOL	
				Escola Politècnica Superior	
				d'Enginyeria de Manresa	
				UNITS	
				mm	
				REV	
				A	
				SHEET	
				1/1	




SECTION VIEW A-A
Scale: 1:10

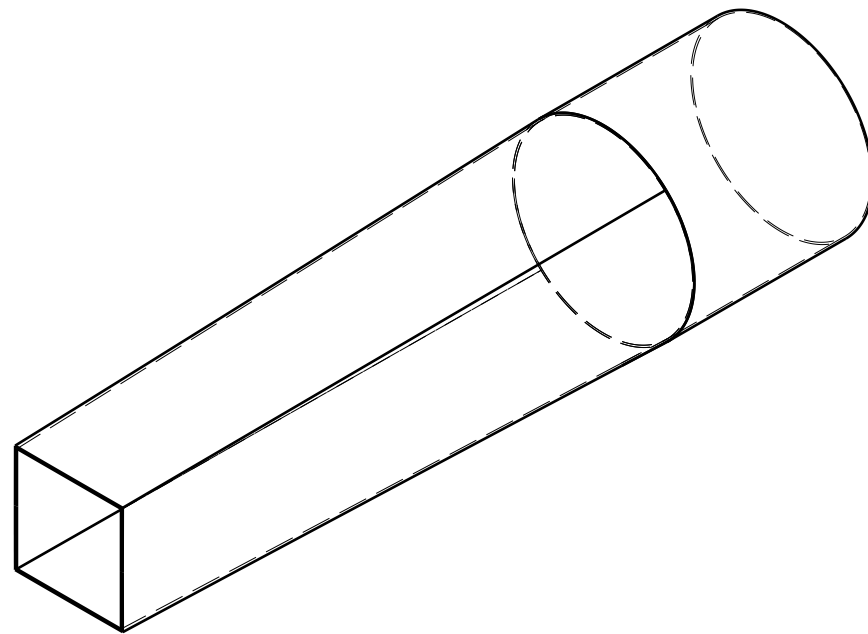
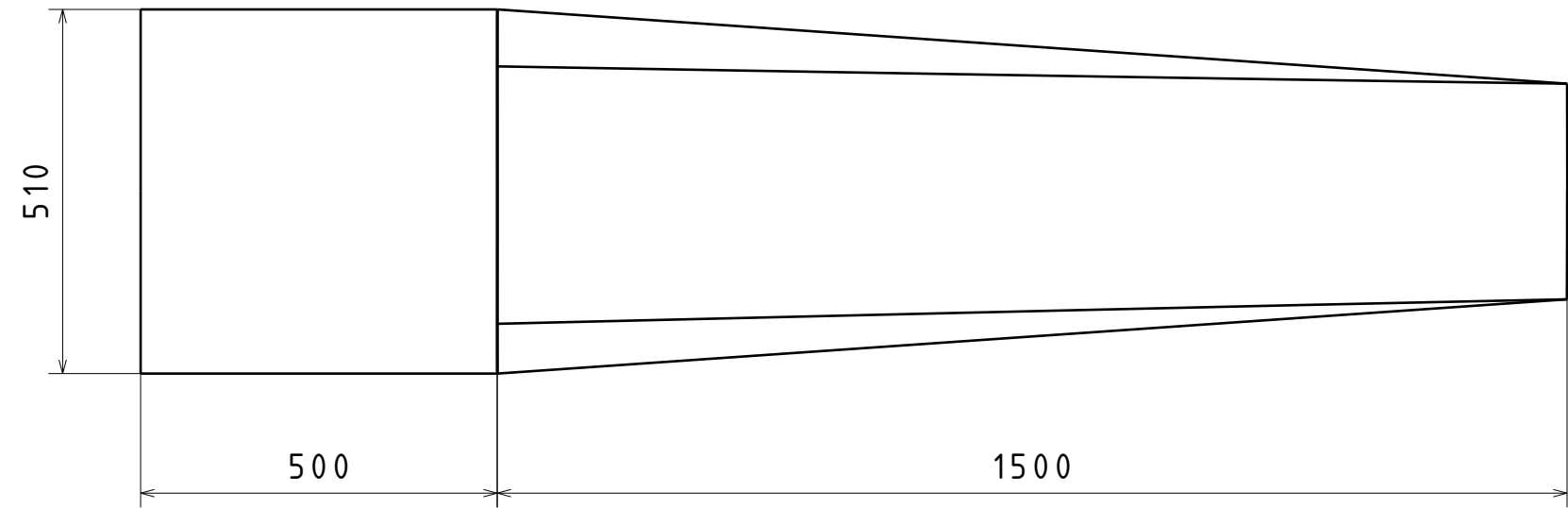
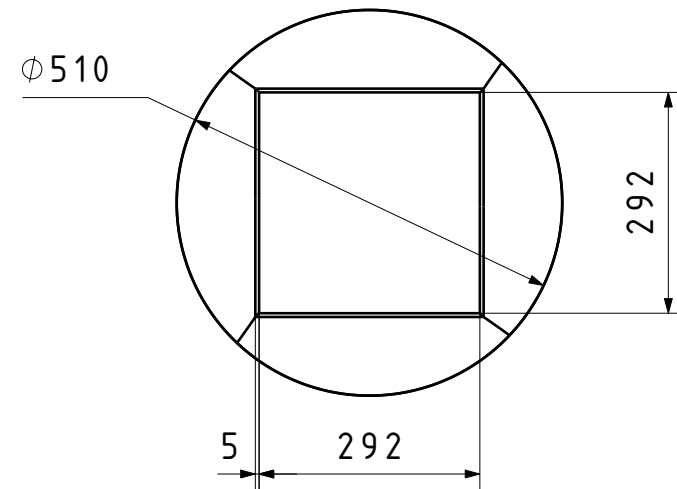


VIEW C
Scale: 1:10



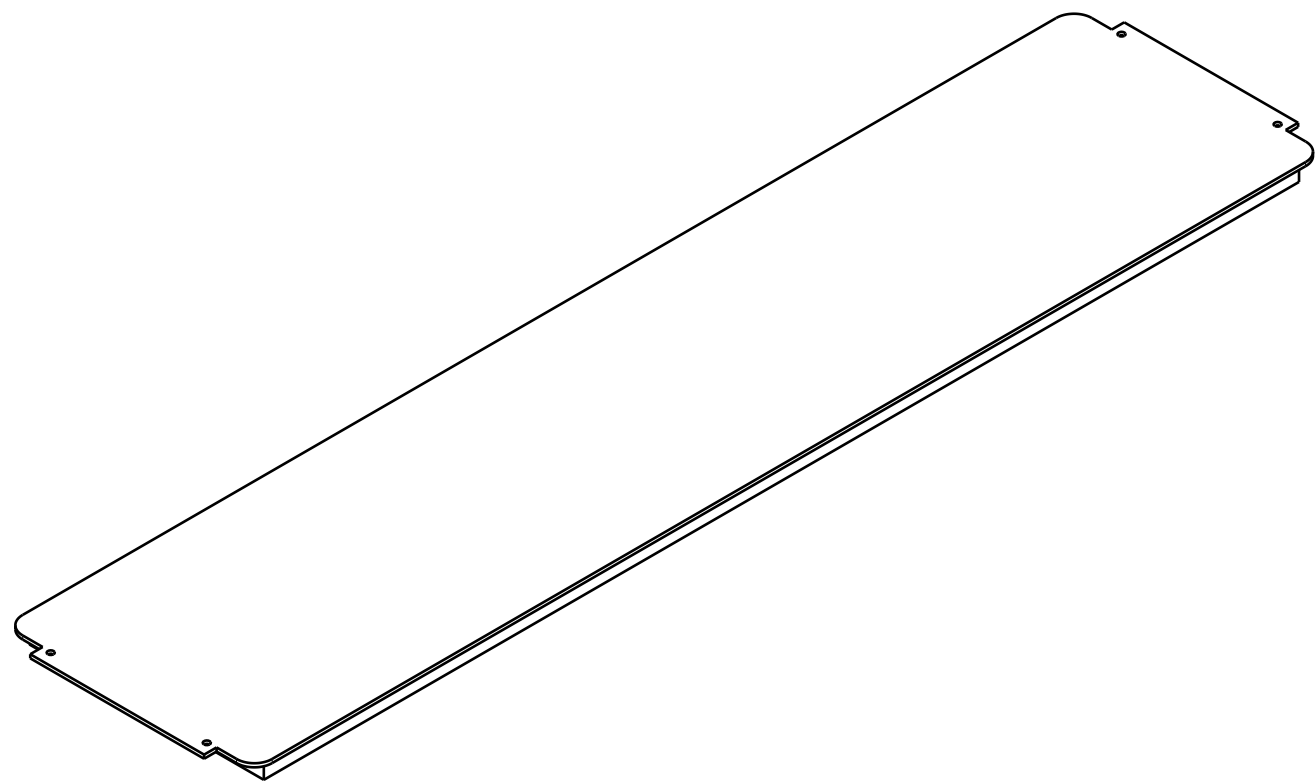
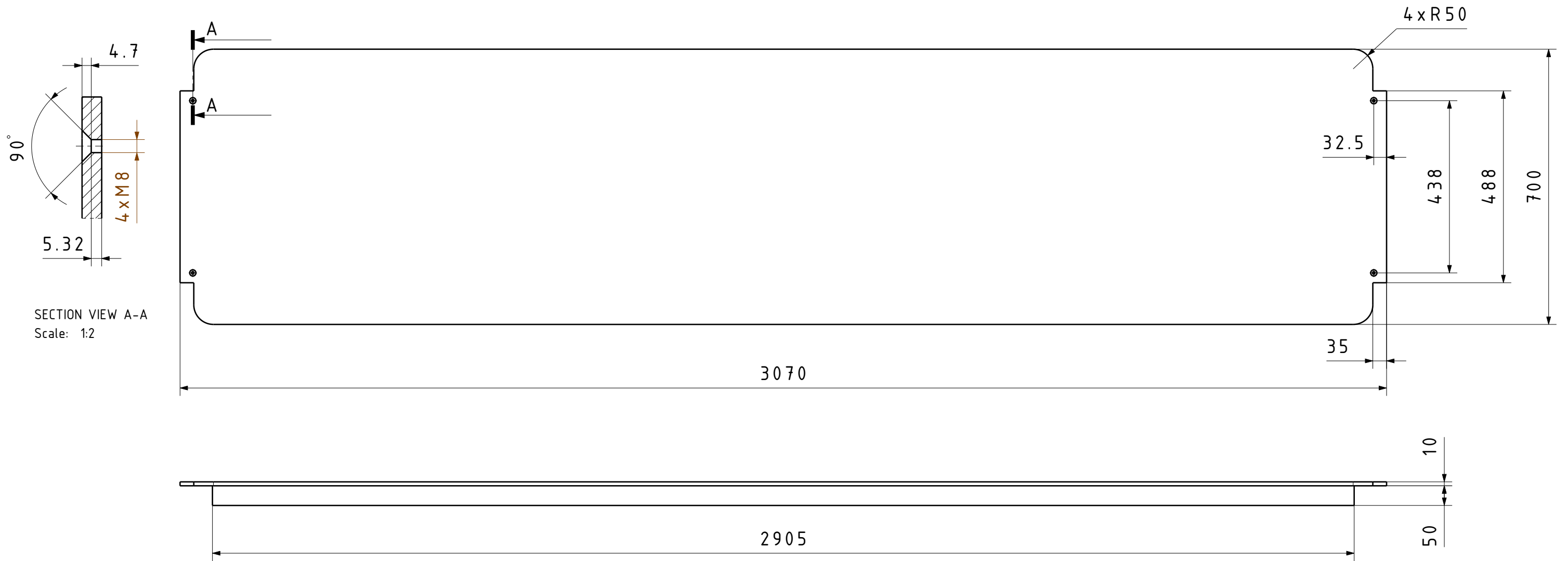
ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:15

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT			
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE			
Arnau Morales	09/12/2019				
CHECKED BY	DATE	SIZE	SCHOOL	 REV A	
J.J. de Felipe	21/12/2019	A3	Escola Politècnica Superior		
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:10	d'Enginyeria de Manresa	UNITS
Arnau Morales	23/07/2019			mm	SHEET 1/1




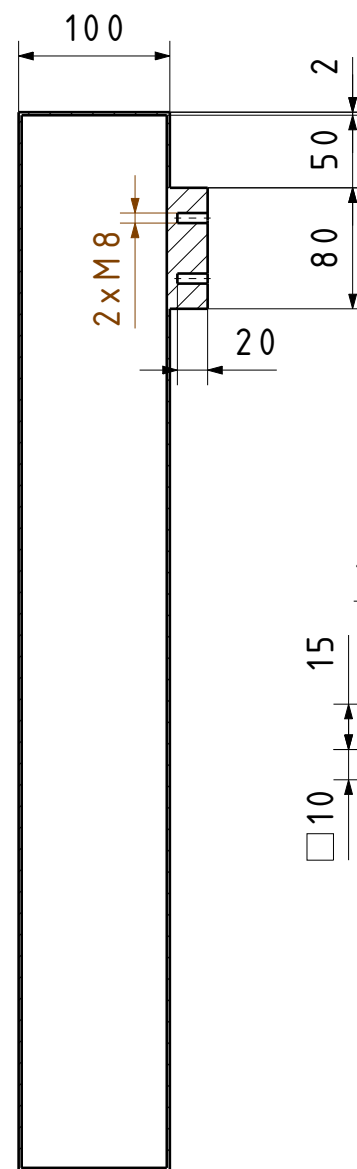
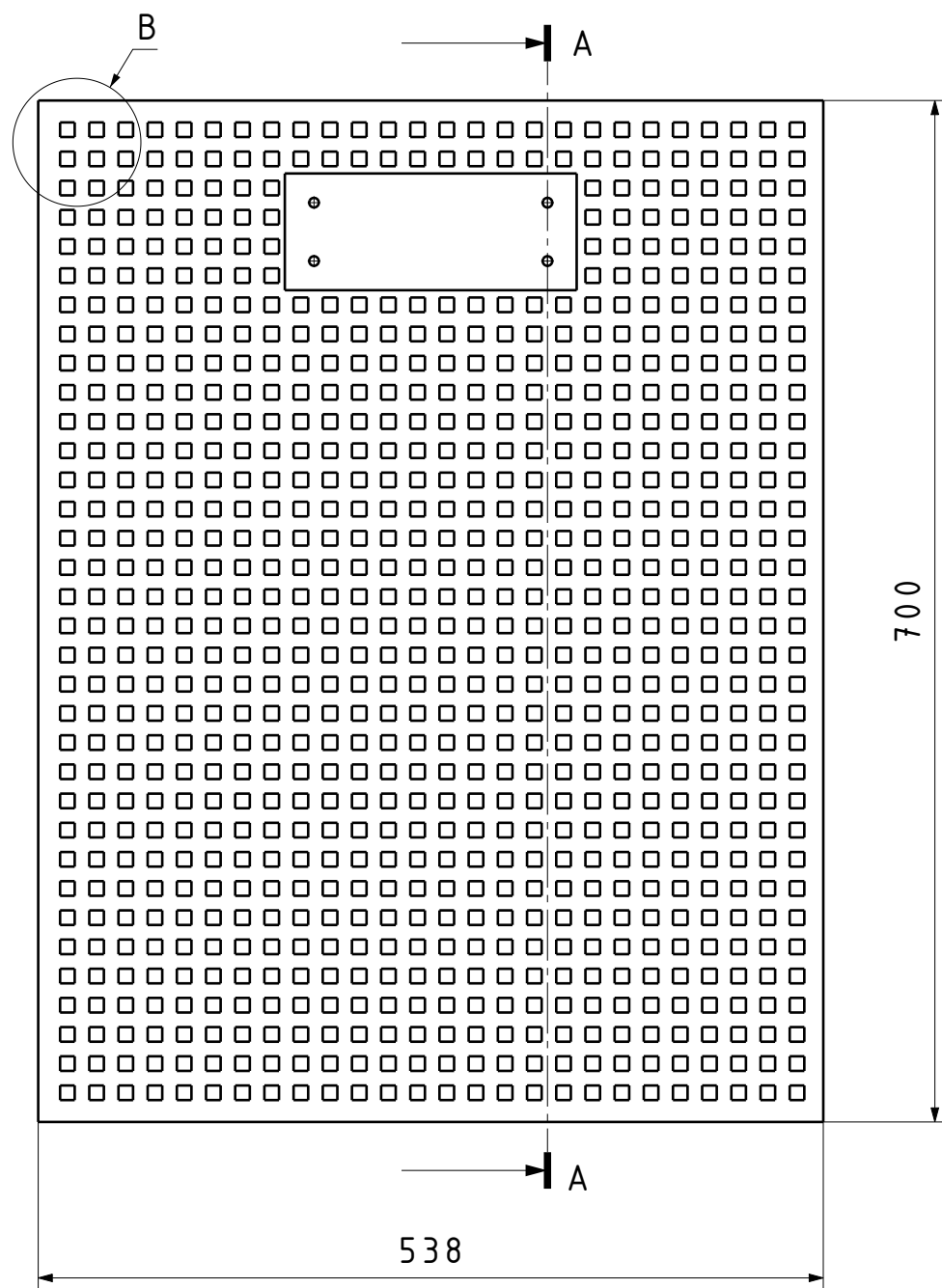
ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:15

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT			
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE			
Arnau Morales	09/12/2019				
CHECKED BY	DATE	SIZE	SCHOOL	UNITS	REV
J.J. de Felipe	21/12/2019	A3	Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa		A
DESIGNED BY	DATE	SCALE			
Arnau Morales	23/07/2019	1:10			

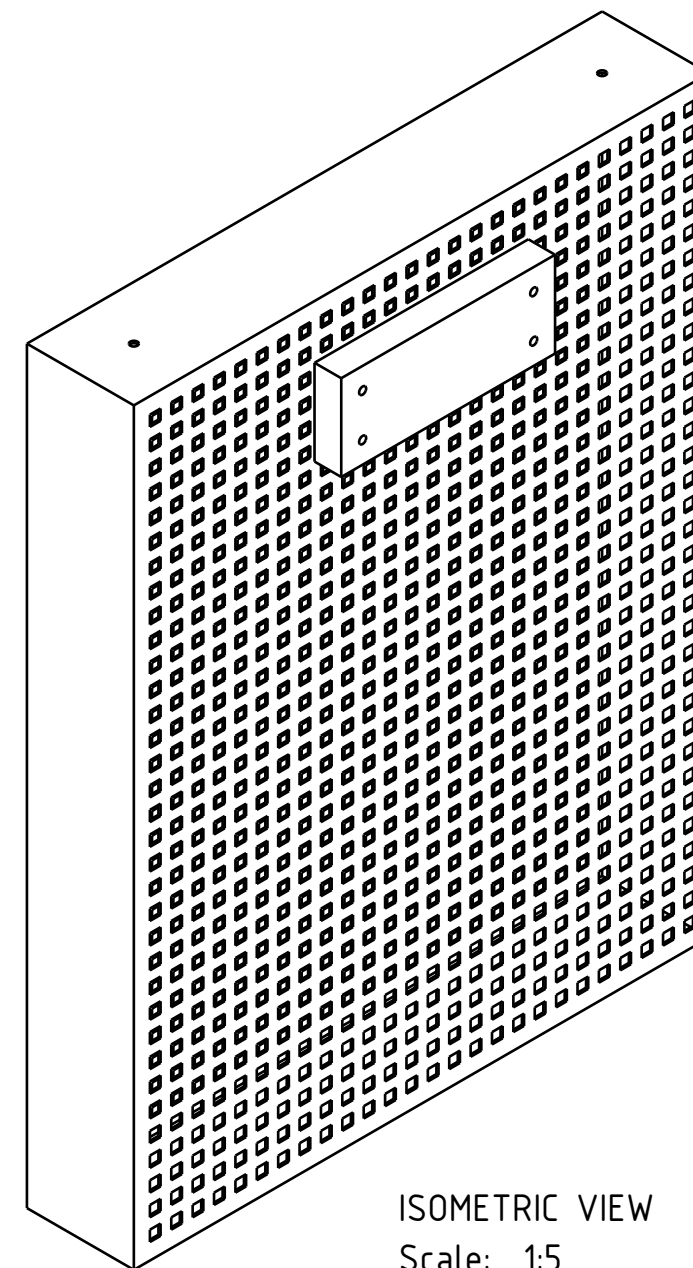
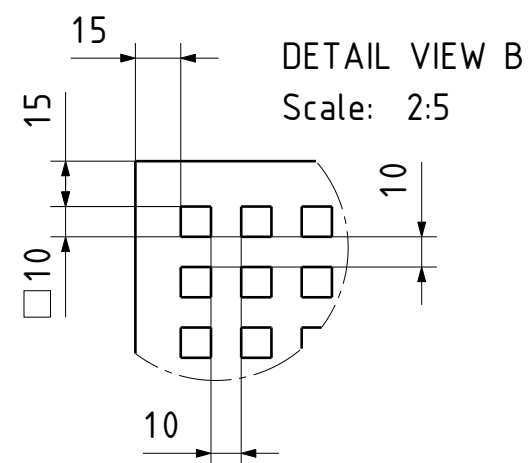


ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:15

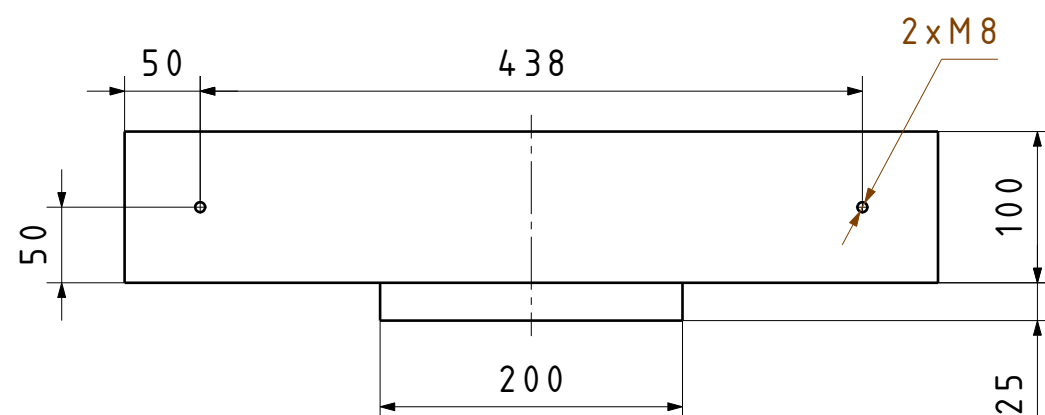
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
		DRAWING TITLE TAULA SUPERIOR BANCADA TUNEL DE VENT			
DRAWN BY Arnau Morales	DATE 09/12/2019	SIZE A3	SCHOOL Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa		REV A
CHECKED BY J.J. de Felipe	DATE 21/12/2019				SHEET 1/1
DESIGNED BY Arnau Morales	DATE 23/07/2019	SCALE 1:10	UNITS mm		



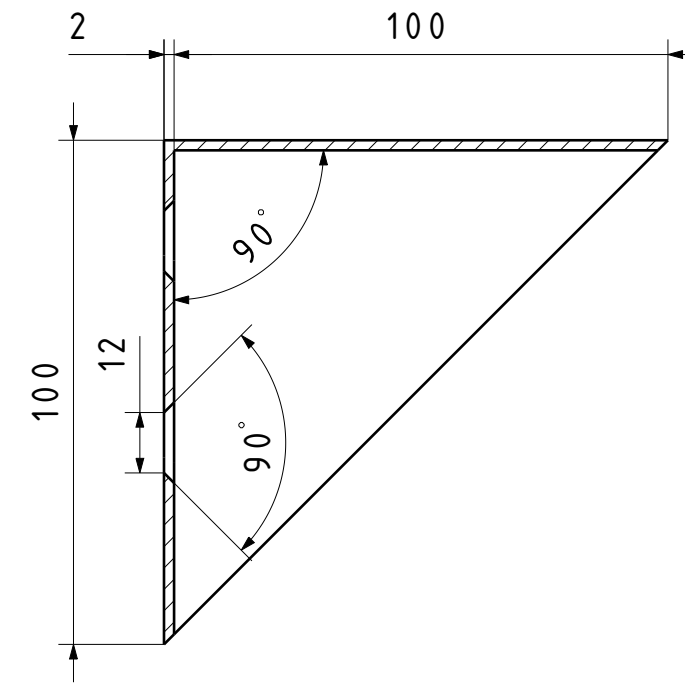
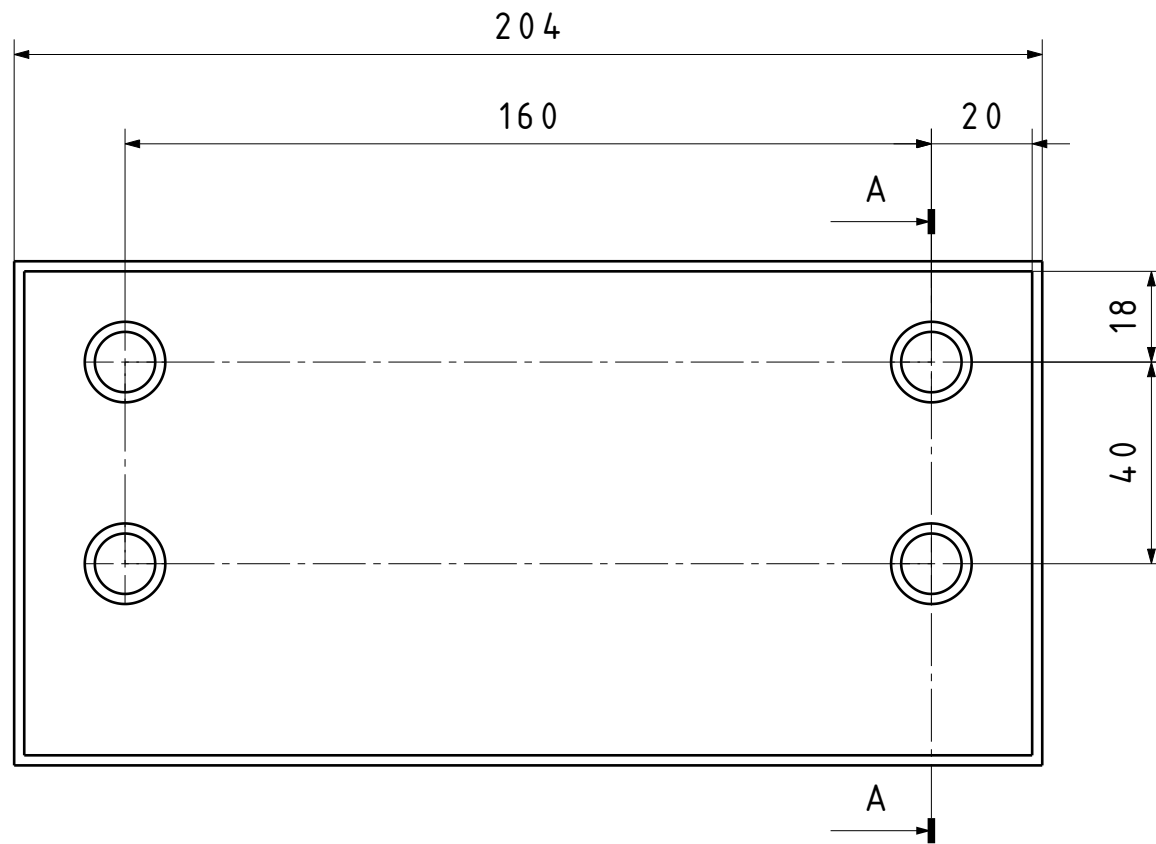
SECTION VIEW A-A
Scale: 1:5



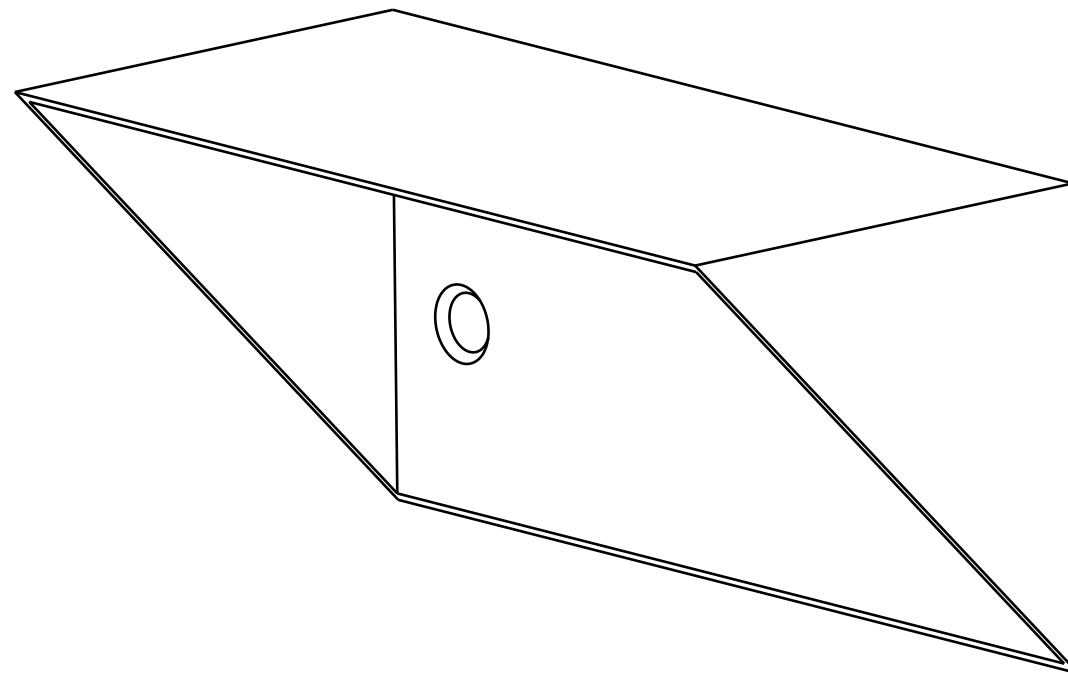
ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:5



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT			
		DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
DRAWN BY	DATE	DRAWING TITLE			
Arnau Morales	09/12/2019				
CHECKED BY	DATE	LATERAL BANCADA TUNEL DE VENT			
J.J. de Felipe	21/12/2019				
DESIGNED BY	DATE	SIZE	SCHOOL	UPC	REV
Arnau Morales	23/07/2019	A3	Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa		A
		SCALE	1:5	UNITS	SHEET
				mm	1/1

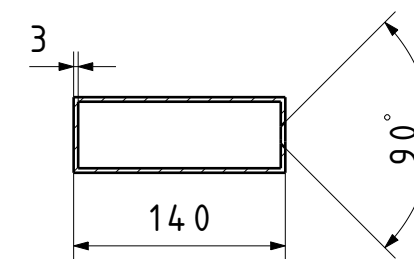
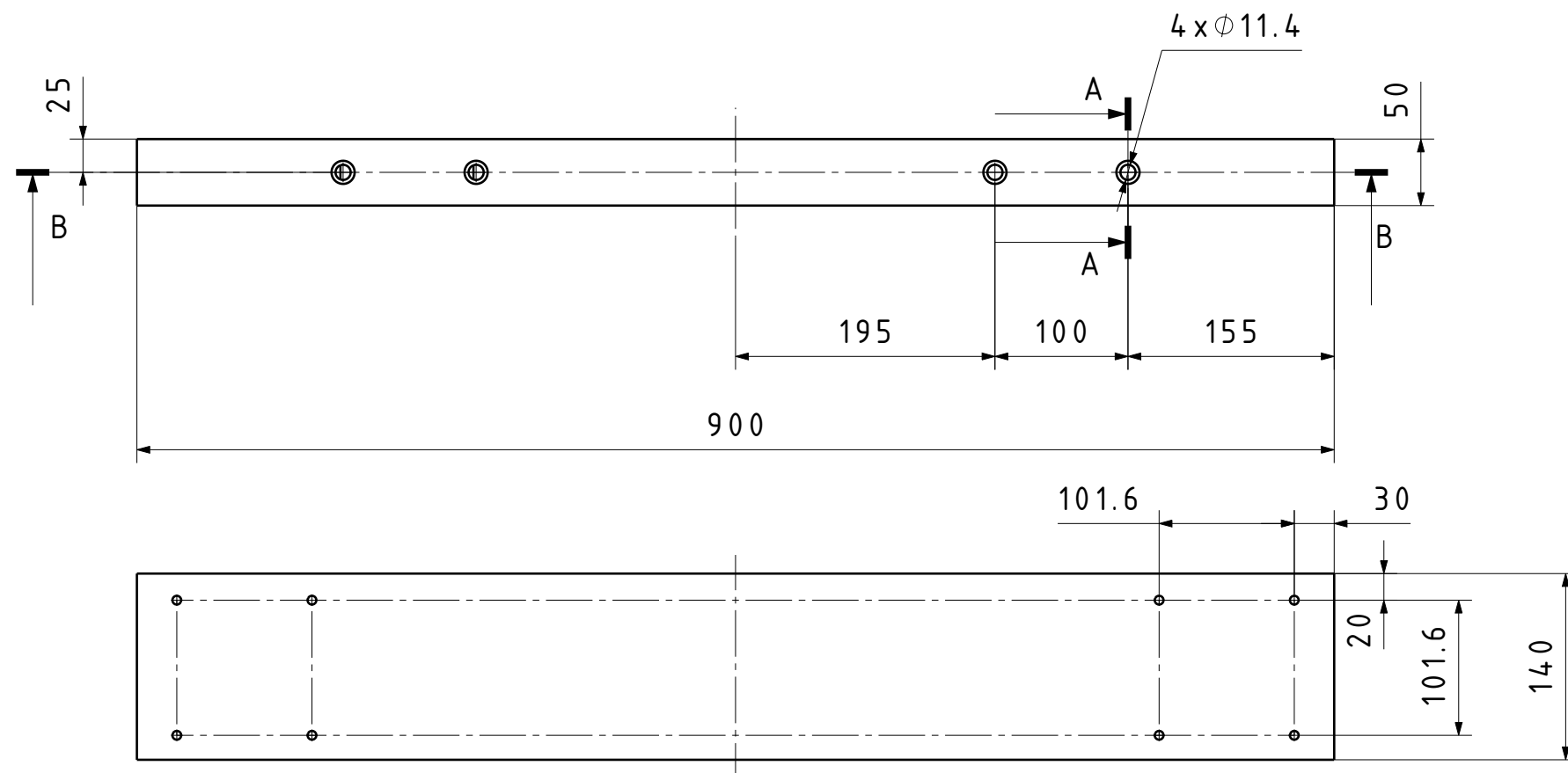


SECTION VIEW A-A
Scale: 2:3

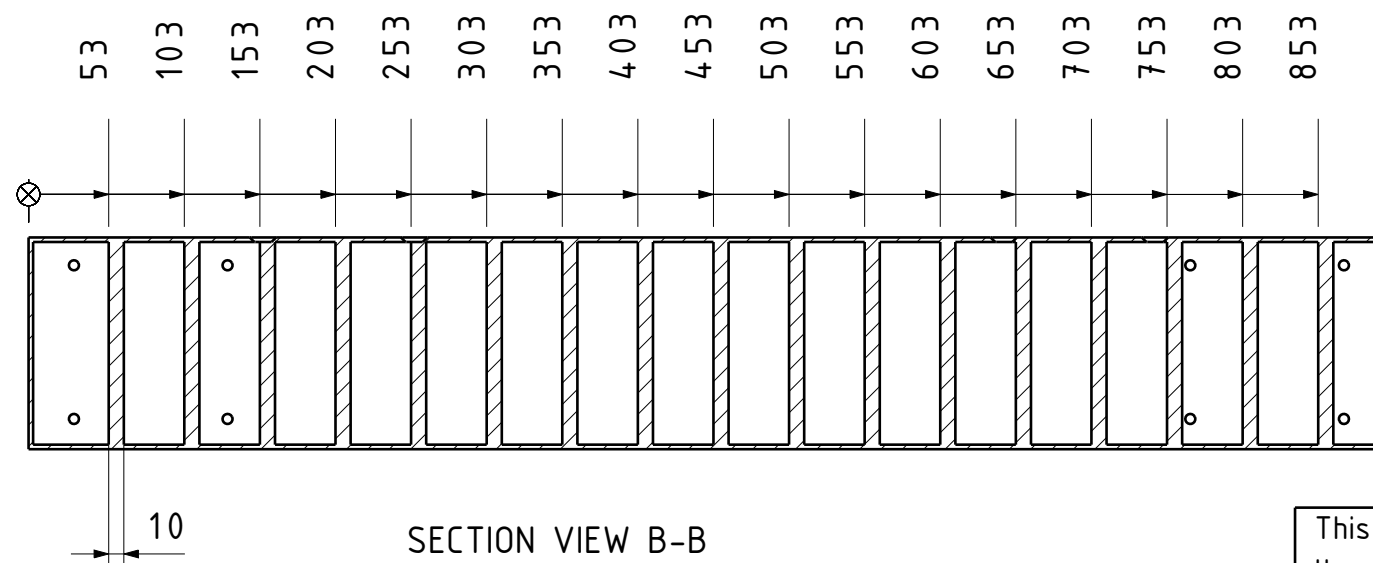


ISOMETRIC VIEW
Scale: 2:3

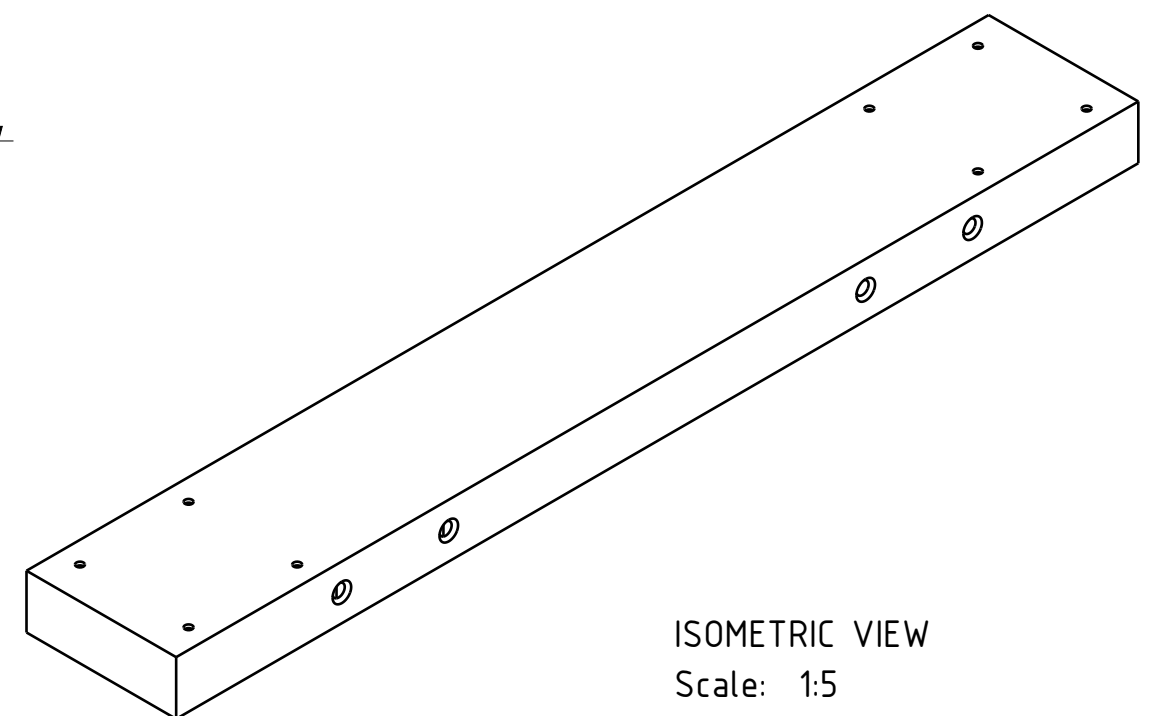
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT			
		DRAWING TITLE COLZE DE REFORÇ BANCADA TUNEL DE VENT			
DRAWN BY Arnau Morales	DATE 09/12/2019	SIZE A3		SCHOOL Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa	REV A
CHECKED BY J.J. de Felipe	DATE 21/12/2019				
DESIGNED BY Arnau Morales	DATE 23/07/2019	SCALE 2:3		UNITS mm	SHEET 1/1



SECTION VIEW A-A
Scale: 1:5



SECTION VIEW B-B
Scale: 1:5



ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:5

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

DRAWN BY
Arnau Morales

DATE
09/12/2019

CHECKED BY
J.J. de Felipe

DATE
21/12/2019

DESIGNED BY
Arnau Morales

DATE
23/07/2019

PROJECT

DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT

DRAWING TITLE

SUPORT RODES BANCADA TUNEL DE VENT

SIZE
A3

SCHOOL

Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa

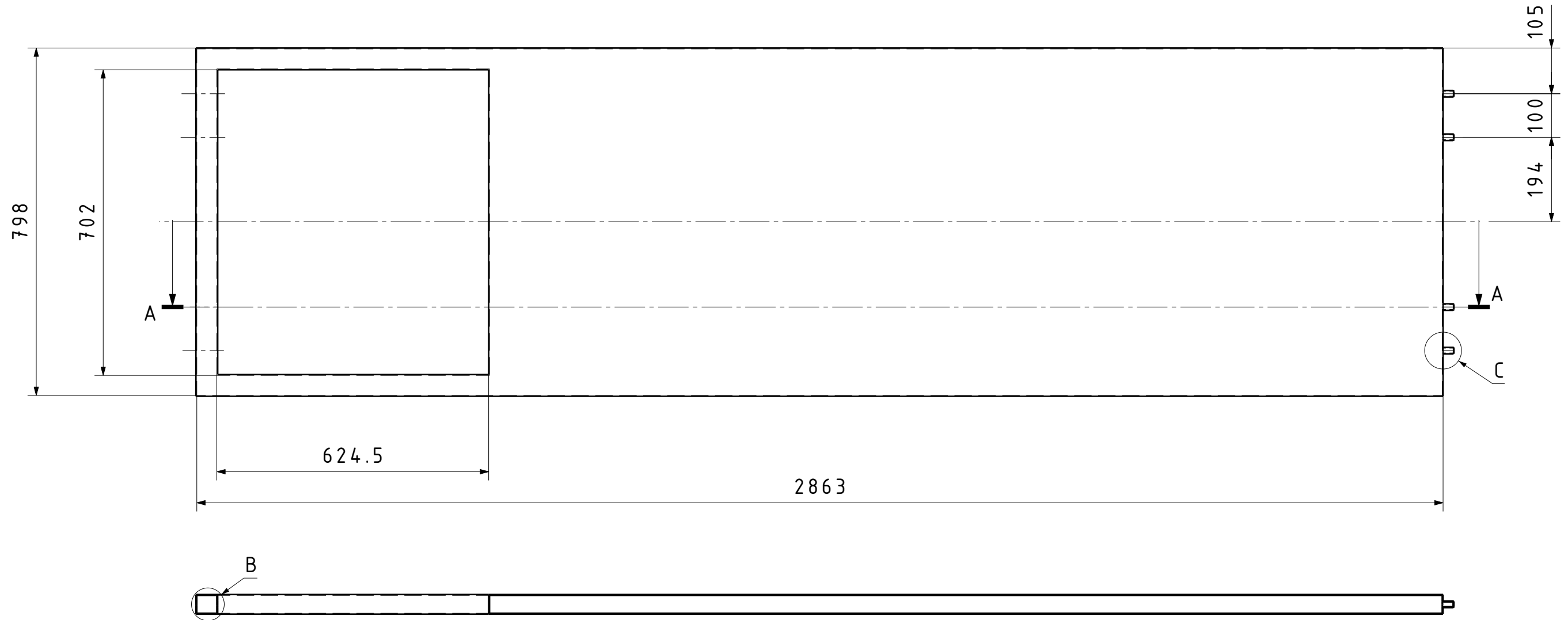


REV
A

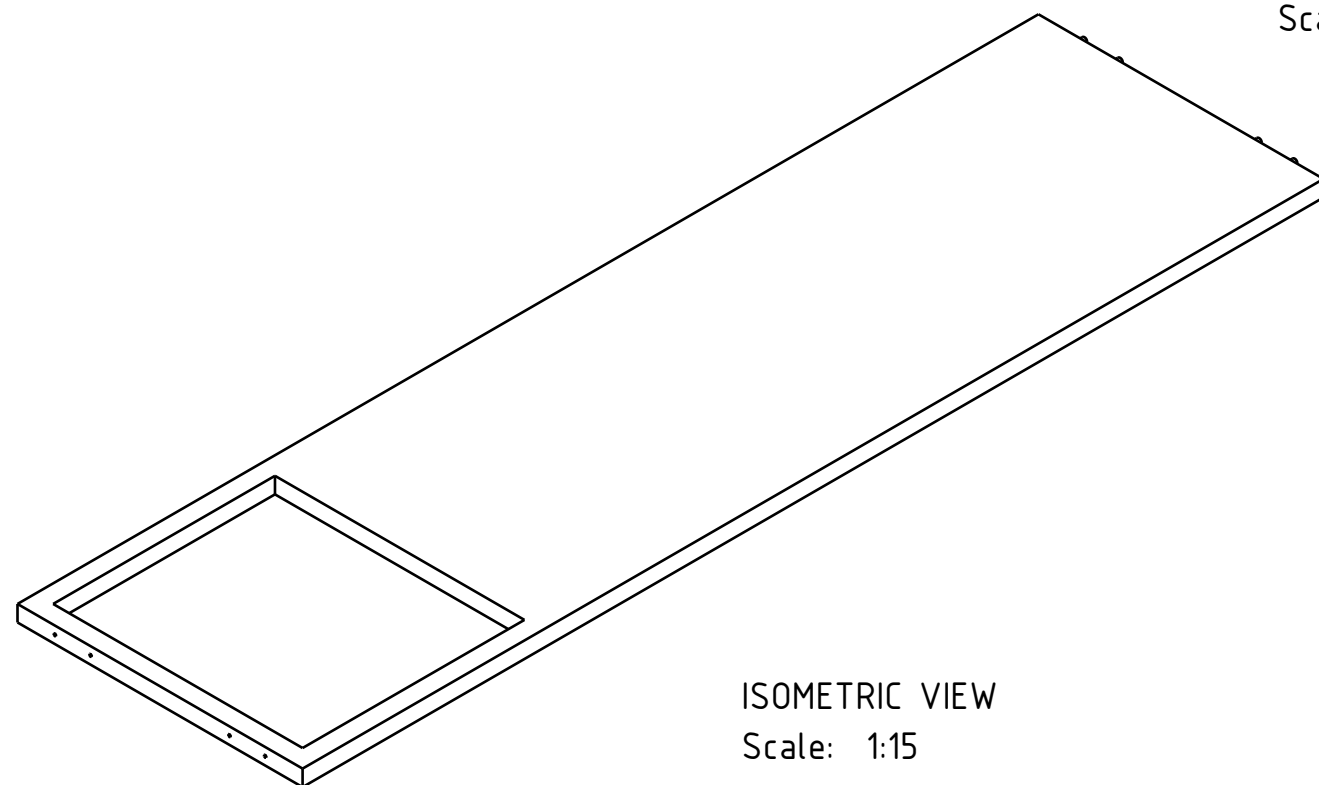
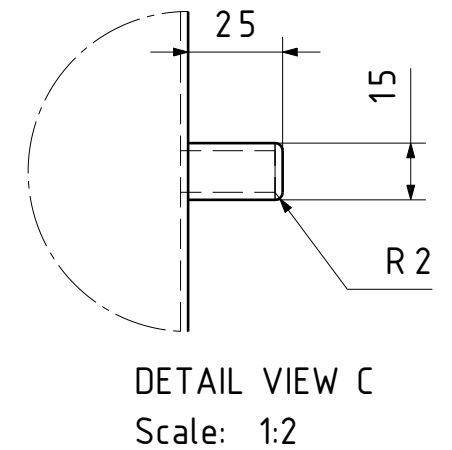
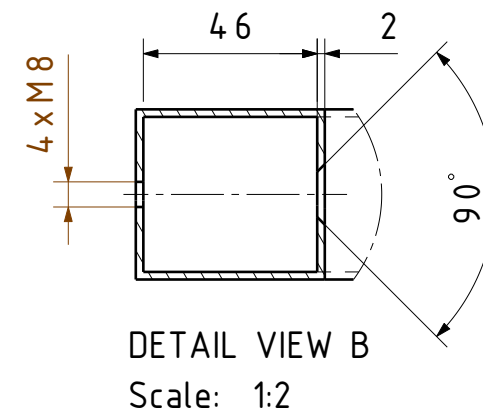
SCALE 1:5

UNITS
mm


SHEET 1/1



SECTION VIEW A-A
Scale: 1:10



ISOMETRIC VIEW
Scale: 1:15

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		PROJECT DISSENY I SIMULACIÓ D'UN TUNEL DE VENT				
		DRAWING TITLE TAULA INFERIOR BANCADA TUNEL DE VENT				
DRAWN BY Arnau Morales	DATE 09/12/2019					
CHECKED BY J.J. de Felipe	DATE 21/12/2019	SIZE A3	SCHOOL Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa		 REV A	
DESIGNED BY Arnau Morales	DATE 23/07/2019	SCALE 1:10		UNITS mm	SHEET 1/1	